

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平10-206661

(43) 公開日 平成10年(1998) 8月7日

(51) Int.Cl.<sup>6</sup>

識別記号

F I

G 0 2 B 6/12

G 0 2 B 6/12

J

G 0 2 F 1/01

G 0 2 F 1/01

C

H 0 4 B 10/02

H 0 4 B 9/00

A

10/18

M

L

審査請求 未請求 請求項の数11 O L (全 17 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号

特願平9-14259

(22) 出願日

平成9年(1997) 1月28日

(71) 出願人 000005223

富士通株式会社

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号

(72) 発明者 内藤 崇男

神奈川県川崎市中原区上小田中4丁目1番  
1号 富士通株式会社内

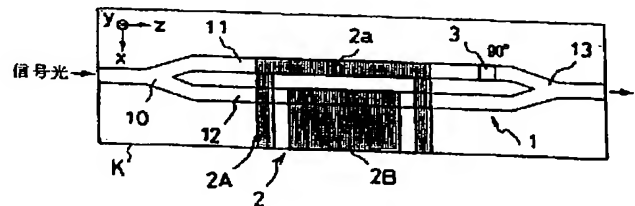
(74) 代理人 弁理士 井桁 貞一

(54) 【発明の名称】 偏波スクランブラ及びそれを用いた光集積回路

(57) 【要約】

【課題】 偏波分散を低減させた簡略な構成で安価な偏波スクランブラを提供する。また、位相変調や強度変調と偏波スクランブルとを一括して行う光集積回路を提供する。

【解決手段】 本偏波スクランブラは、垂直直線偏波状態で光導波路1に入射される信号光を分岐部10で第1、2光路11、12に分岐する。分岐された各信号光は、電極パターン2に印加される所定の電圧に応じて位相が変化され、更に、第1光路11を伝搬する信号光は、偏波面回転素子3によりその偏波が略90度回転される。偏波面回転素子3を通過した信号光と第2光路を伝搬された信号光とが合波部13で合波されることによって、入射された信号光の偏波状態がスクランブルされる。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 入射される信号光を2つに分岐する第1分岐手段と、

電気光学効果を有する材料で形成され、前記第1分岐手段で分岐された一方の信号光が伝搬される第1光路と、電気光学効果を有する材料で形成され、前記第1分岐手段で分岐された他方の信号光が伝搬される第2光路と、前記第1光路及び前記第2光路にそれぞれ設定された所定の区間のうちの少なくとも一方の光路の区間に対し、所定の電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相を変化させる第1電圧印加手段と、

前記第1光路及び前記第2光路を伝搬された各信号光を合波する第1合波手段と、

前記第1光路及び前記第2光路のうちの少なくとも一方の光路について、前記所定の区間と前記第1合波手段との間で信号光の偏波を回転させて、前記第1光路及び前記第2光路を伝搬される各信号光の相対的な偏波角を調整する第1偏波面回転手段と、

を備えて構成したことを特徴とする偏波スクランブラ。

【請求項2】 前記第1偏波面回転手段が、前記各信号光の相対的な偏波角を90度を中心とした角度に調整することを特徴とする請求項1記載の偏波スクランブラ。

【請求項3】 前記第1偏波面回転手段が、前記第1光路及び前記第2光路のうちの一方の光路について、前記所定の区間と前記第1合波手段との間に信号光の偏波を略90度回転させる第1回転子を備えたことを特徴とする請求項2記載の偏波スクランブラ。

【請求項4】 前記第1偏波面回転手段が、前記第1光路及び前記第2光路の両方について、前記所定の区間と前記第1合波手段との間にそれぞれ第2回転子及び第3回転子を備え、それら第2回転子及び第3回転子うちの一方の回転子が信号光の偏波を略45度回転させ、他方の回転子が信号光の偏波を略-45度回転させるものとしたことを特徴とする請求項2記載の偏波スクランブラ。

【請求項5】 前記第1電圧印加手段が、前記第1光路及び前記第2光路にそれぞれ設定された所定の区間の両方に対して、互いに逆相の所定の電圧を印加することを特徴とする請求項1～4のいずれか1つに記載の偏波スクランブラ。

【請求項6】 請求項1～5のいずれか1つに記載の偏波スクランブラを用いた光集積回路であって、前記偏波スクランブラの第1分岐手段の入力側端部に一端が接合し、他端に入射された信号光が前記第1分岐手段まで伝搬される、電気光学効果を有する材料で形成された第3光路と、

該第3光路に設定された所定の区間に対して所定の位相変調電圧を印加して、伝搬される信号光の位相変調を行う第1位相変調電圧印加手段と、

を備え、前記第3光路に対して単一方向の成分だけを有

する直線偏波状態の信号光を入射し、その信号光に対して位相変調及び偏波スクランブルを一括して行い前記偏波スクランブラの第1合波手段から出射する構成としたことを特徴とする光集積回路。

【請求項7】 請求項1～5のいずれか1つに記載の偏波スクランブラを用いた光集積回路であって、

入射される信号光を2つに分岐する第2分岐手段と、電気光学効果を有する材料で形成され、前記第2分岐手段で分岐された一方の信号光が伝搬される第4光路と、

電気光学効果を有する材料で形成され、前記第2分岐手段で分岐された他方の信号光が伝搬される第5光路と、

前記第4光路及び前記第5光路にそれぞれ設定された所定の区間のうちの少なくとも一方の光路の区間に対し、

所定の強度変調電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相変調を行う第1強度変調電圧印加手段と、

出力側端部が前記偏波スクランブラの第1分岐手段の入力側端部に接合し、前記第4光路及び前記第5光路を伝搬された各信号光を合波して前記第1分岐手段に出力する第2合波手段と、

を備え、前記第4光路及び前記第5光路に対して単一方向の成分だけを有する直線偏波状態の信号光を前記第2分岐手段に入射し、その信号光に対して強度変調及び偏波スクランブルを一括して行い前記偏波スクランブラの第1合波手段から出射する構成としたことを特徴とする光集積回路。

【請求項8】 電気光学効果を有する材料で形成され、信号光が伝搬される1つの光路、及び該光路に設定された所定の区間に対して所定の位相変調電圧を印加して、伝搬される信号光の位相変調を行う位相変調電圧印加手段を有する位相変調手段と、

電気光学効果を有する材料で形成され、信号光が伝搬される1つの光路、及び該光路に設定された所定の区間に対して、所定の電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相を変化させる電圧印加手段を有する偏波スクランブル手段と、

前記位相変調手段の出力側端部と前記偏波スクランブル手段の入力側端部とを接続し、前記位相変調手段の光路を伝搬された信号光の偏波を回転させて、前記偏波スクランブル手段の光路に対し2つの方向の成分を有する偏波状態の信号光を出力する第1の偏波面回転手段と、

を備えて構成したことを特徴とする光集積回路。

【請求項9】 前記位相変調手段と前記偏波スクランブル手段とに対し共通に電圧を印加する電極を備えたことを特徴とする請求項8記載の光集積回路。

【請求項10】 入射される信号光を2つに分岐する分岐手段、電気光学効果を有する材料で形成され、前記分岐手段で分岐された一方の信号光が伝搬される第1光路、電気光学効果を有する材料で形成され、前記分岐手段で分岐された他方の信号光が伝搬される第2光路、前記第1光路及び前記第2光路にそれぞれ設定された所定

の区間のうちの少なくとも一方の光路の区間に対し、所定の強度変調電圧を印加して、その区間を伝搬される前記信号光の位相変調を行う強度変調電圧印加手段、及び前記第1光路及び前記第2光路をそれぞれ伝搬された各信号光を合波する合波手段を有する強度変調手段と、電気光学効果を有する材料で形成され、信号光が伝搬される1つの光路、及び該光路に設定された所定の区間に対して、所定の電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相を変化させる電圧印加部を有する偏波スクランブル手段と、

前記強度変調手段の出力側端部と前記偏波スクランブル手段の入力側端部とを接続し、前記強度変調手段の合波手段から出力された信号光の偏波を回転させて、前記偏波スクランブル手段の光路に対し2つの方向の成分を有する偏波状態の信号光を出力する第1の偏波面回転手段と、

を備え、前記強度変調手段の分岐手段に単一方向の成分だけを有する直線偏波状態の信号光を入射し、その信号光に対して強度変調及び偏波スクランブルを一括して行い前記偏波スクランブル手段から出射する構成としたことを特徴とする光集積回路。

【請求項11】 前記偏波スクランブル手段から出射された信号光の偏波を略90度回転させる第2の偏波面回転手段と、

該前記偏波面回転手段から出力された信号光が伝搬される、電気光学効果を有する材料で形成された1つの光路、及び該光路に設定された所定の区間に対して、所定の電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相を変化させる電圧印加手段を有する補償用偏波スクランブル手段と、

を備え、該補償用偏波スクランブル手段により前記偏波スクランブル手段で発生した偏波分散を補償する構成としたことを特徴とする請求項8～10のいずれか1つに記載の光集積回路。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、伝送される信号光の偏波状態をスクランブルする偏波スクランブラ及びそれを用いた光集積回路に関し、特に、偏波分散を低減させた偏波スクランブラ、及び位相変調や強度変調と偏波スクランブルとを一括して行う光集積回路に関する。

【0002】

【従来の技術】従来、数千キロメートルに及ぶ大洋を横断する長距離の光伝送システムでは、光信号を電気信号に変換し、タイミング再生(retiming)、波形等化(reshaping)及識別再生(regenerating)を行う光再生中継器を用いて伝送を行っていた。しかし、現在では、光増幅器の実用化が進み、光増幅器を線形中継器として用いる光増幅中継伝送方式が検討されている。光再生中継器を光増幅中継器に置き換えることにより、中継器内の部品点

数を大幅に削減し、信頼性を確保すると共に大幅なコストダウンが見込まれる。

【0003】1993年にM.G Taylor は、光中継増幅器にて発生する雑音光が信号光の偏波状態に依存し、余分雑音光が増大する現象（偏波ホールバーニング、Polarization hole burning）を指摘した。偏波ホールバーニングにより、信号光対雑音光の比（以下、光SNRとする）の平均値が低下すると同時に光SNRの揺らぎが増大するために、光増幅中継伝送を行う上で大きな問題になった。

【0004】この対策として、送信側において信号光の偏波状態を積極的に可変する偏波スクランブル (Polarization scrambling) が提案された。その偏波スクランブルを行う方法としては、例えば、位相変調器を用いた方法、光ファイバの側面から応力を与える方法、2つの光源を用いた方法などがある。例えば、1994年にF. Heisma nnらは、伝送速度5.33Gb/s、伝送距離8100kmの実験において、45度入力偏波状態指定のニオブ酸リチウム (Li NbO<sub>3</sub>：以下LNとする) の位相変調器を用いて行う偏波スクランブルにより、偏波状態の繰り返し周波数が、40kHzにおいて4dBのQ値改善、10.66GHzにおいて5dBのQ値改善を達成している。前者の繰り返し周波数は伝送速度よりも低く、低速偏波スクランブルと呼ばれ、後者は伝送速度以上なので高速偏波スクランブルと呼ばれている。高速偏波スクランブルは、伝送路及び光増幅中継器の偏波依存性損失による光SNRの揺らぎを抑制する効果があるために、その改善量大きい。

【0005】また、光伝送システムの大容量化を実現する方法の1つとして、1つの伝送路に2つ以上の異なる波長を持つ光信号を多重して伝送する波長多重 (WDM) 光伝送方式が注目されている。このWDM光伝送方式と上記の光増幅中継伝送方式を組み合わせたWDM光増幅中継伝送方式においては、光増幅器を用いて2つ以上の異なる波長を持つ光信号を一括して増幅することができ、簡素な構成（経済的）で、大容量かつ長距離伝送が可能である。

【0006】WDM光増幅中継伝送方式においては、伝送路の非線形効果による伝送特性劣化を低減することが重要である。例えば、非線形効果の一つである4光波混合 (Four-wave mixing) は、いくつかの信号光の偏波状態が一致する場合にその発生効率が最大になる。従って、高速偏波スクランブルを行って、いくつかの信号光の偏波状態の一致が積極的に持続できないように設定することができる。

【0007】例えば、1996年にT. Naito らは、4波長多重、伝送速度5.33Gb/s、伝送距離4800kmの実験において、偏波状態の繰り返し周波数が伝送速度の2倍の高速偏波スクランブルを行い4光波混合発生率を低減し、伝送特性の改善を確認している。また、WDM光増幅中継伝送方式における他の重要な課題の一つに、チャネル間

隔の低減、即ち波長多重数の増大がある。しかし、高速偏波スクランブルをかけた信号光のスペクトルは広がるために、波長多重の高密度化を実現する上での障害になる。

【0008】そこで、1995年にN.S Bergano らは、比較的的信号光のスペクトル拡がりの小さい、繰り返し周波数が伝送速度の高速偏波スクランブルを提案している(N.S Bergano et al., '100 Gb/s WDM transmission of twenty 5 Gb/s NRZ data channels over transoceanic distances using a gain flattened amplifier chain', ECOC'95, Th. A. 3.1, pp. 967-970, 1995. 参照)。

【0009】この提案による構成は、図17のブロック図に示すように、強度変調された光信号の偏波状態を偏波スクランブルさせたものである。ただし、伝送特性を改善するために信号の強度変調と偏波スクランブルとの同期を必要とする。更に、伝送特性の改善を目的として、1996年にN.S Bergano らは、強度変調、位相変調及び高速偏波スクランブルを組み合わせて用いる、図18のブロック図に示すような方式のものを提案している(N.S Bergano et al., 'Bit-synchronous polarization and phase modulation scheme for improving the performance of optical amplifier transmission systems', Electronics Letters, Vol. 32, No. 1, pp. 52-54, 1996. 参照)。

【0010】ここで、従来の位相変調器を用いた偏波スクランブラの構成の一例を図19に示す。図19の偏波スクランブラは、ストレートライン型のLN光導波路91上に進行波型の電極パターン92が配置された位相変調器により偏波スクランブルを実現する。LN光導波路91は、電気光学効果を示すLN結晶材料をストレートライ型の光導波路に形成したもので、その表面に設けられた電極パターン92より変調電圧を印加して屈折率を変化させ位相を変調するものである。このLN光導波路91には、直線偏波の光信号が図のx軸及びy軸に対して方位角が45度近傍で入力され、その入力光のx成分及びy成分間の位相差を変調電圧に応じて変えることで偏波スクランブルを行う。x, y成分間の位相差 $\Delta\phi(t)$ は次式で表される。

$$\text{【0011】 } \Delta\phi(t) = \pi / \lambda [(n_o^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13}) V(t) L \Gamma]$$

ただし、 $\lambda$ は光波長、 $n_o$ は常光の屈折率、 $n_e$ は異常光の屈折率、 $\gamma_{13}$ 、 $\gamma_{33}$ は電気光学定数、 $V(t)$ は変調(印加)電圧、 $L$ は電極長、 $\Gamma$ は変調電圧低減係数である。このように位相差 $\Delta\phi(t)$ は変調電圧に比例する。偏波スクランブルを実現する手段として、上記のLN位相変調器を用いたものは有力な候補である。しかし、LN光導波路の各x, y方向の光屈折率が大きく異なるために、各方向の光成分間に伝送遅延差が発生してしまうという欠点がある。例えば、F.Heinsmann らは16psの伝送遅延差が発生したと報告している。これは偏波分散

が大きいことを意味し、伝送特性を劣化させる要因の一つになり問題である。

【0012】この偏波分散の対策としては、例えば、本出願人による1995年電子情報通信学会、B-755(偏波スクランブラを用いた光増幅中継伝送システムの検討2)や、深田らによる1996年電子情報通信学会、B-1102(偏波スクランプリングによるスペクトル拡がりの解析)等の報告にあるように、2つのLN位相変調器を、一方のLN光導波路のx軸が他方のy軸に一致するように並列または直列に接続し、それぞれを駆動する電圧を逆相とすることで偏波分散を相殺する技術が提案されている。この技術によれば、偏波分散を低減する共に、偏波スクランブルされた光のスペクトルを狭帯域化することができる。

#### 【0013】

【発明が解決しようとする課題】しかしながら、上記のような従来の技術では、偏波スクランブルによる偏波分散を防ぐために、同一の位相変調器を組み合わせる必要があり、各々の位相変調器には偏波状態が制御された光信号をそれぞれ入力しなければならないため、各位相変調器間の接続等の装置構成が複雑になってしまい、部品点数や組立て工数等が増加してコストの上昇を招き、小型化も困難になるという問題がある。

【0014】また、上述したように強度変調や位相変調と偏波スクランブルとを一括して行う場合には、例えば、図20の従来の装置構成例に示すように、強度変調器、バンドカプラ、偏光子及び偏波スクランブラの各要素それぞれを、例えば偏波面保存ファイバ等を用いて接続する必要がある。このような構成では、光結合箇所が更に多くなり結合損が増大するために、送信光の光SNRが劣化してしまうという問題や、多数の高額な部品を必要としスプライス接続等の組立て工数も増大するために高価な装置になってしまうという問題がある。

【0015】本発明は上記問題点に着目してなされたもので、偏波分散を低減させた簡略な構成で安価な偏波スクランブラを提供することを目的とする。また、偏波スクランブルの機能と位相変調若しくは強度変調の機能を備えた簡略な構成の光集積回路を提供することを目的とする。

#### 【0016】

【課題を解決するための手段】このため本発明のうちの請求項1に記載の発明は、入射される信号光を2つに分岐する第1分岐手段と、電気光学効果を有する材料で形成され、前記第1分岐手段で分岐された一方の信号光が伝搬される第1光路と、電気光学効果を有する材料で形成され、前記第1分岐手段で分岐された他方の信号光が伝搬される第2光路と、前記第1光路及び前記第2光路にそれぞれ設定された所定の区間のうちの少なくとも一方の光路の区間に対し、所定の電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相を変化させる第1電圧印加

手段と、前記第1光路及び前記第2光路を伝搬された各信号光を合波する第1合波手段と、前記第1光路及び前記第2光路のうちの少なくとも一方の光路について、前記所定の区間と前記第1合波手段との間で信号光の偏波を回転させて、前記第1光路及び前記第2光路を伝搬される各信号光の相対的な偏波角を調整する第1偏波面回転手段と、を備えて構成される。

【0017】かかる構成によれば、第1分岐部に入力された信号光は、第1、2光路に分岐されそれぞれを伝搬し、第1電圧印加手段によって印加される所定の電圧に応じてその位相が変化する。更に、第1偏波面回転手段によって、第1光路及び第2光路のうちの少なくとも一方の光路を伝搬する信号光の偏波が回転され、それぞれの信号光の相対的な偏波角が調整される。そして、第1光路及び第2光路を通過した各信号光が第1合波手段で合波されることにより、入射された信号光の偏波状態がスクランブルされて出射されるようになる。

【0018】請求項2に記載の発明では、請求項1に記載の発明において、前記第1偏波面回転手段が、前記各信号光の相対的な偏波角を90度を中心とした角度に調整するものとする。かかる構成によれば、第1偏波面回転手段によって、第1光路及び第2光路を通過した各信号光の偏波状態が相対的に90度を中心とした偏波角を有するように調整される。

【0019】請求項3に記載の発明では、請求項2に記載の発明の具体的な構成として、前記第1偏波面回転手段が、前記第1光路及び前記第2光路のうちの一方の光路について、前記所定の区間と前記第1合波手段との間に信号光の偏波を略90度回転させる第1回転子を備えるものとする。請求項4に記載の発明では、請求項2に記載の発明の具体的な構成として、前記第1偏波面回転手段が、前記第1光路及び前記第2光路の両方について、前記所定の区間と前記第1合波手段との間にそれぞれ第2回転子及び第3回転子を備え、それら第2回転子及び第3回転子うちの一方の回転子が信号光の偏波を略45度回転させ、他方の回転子が信号光の偏波を略-45度回転させるものとする。

【0020】請求項5に記載の発明では、請求項1～4のいずれか1つに記載の発明において、前記第1電圧印加手段が、前記第1光路及び前記第2光路にそれぞれ設定された所定の区間の両方に対して、互いに逆相の所定の電圧を印加するものとする。かかる構成によれば、第1電圧印加手段によって、第1光路及び前記第2光路を伝搬する各信号光の位相がそれぞれ異なる方向に変化するようになる。

【0021】請求項6に記載の発明では、請求項1～5のいずれか1つに記載の偏波スクランブラを用いた光集積回路であって、前記偏波スクランブラの第1分岐手段の入力側端部に一端が接合し、他端に入射された信号光が前記第1分岐手段まで伝搬される、電気光学効果を有

する材料で形成された第3光路と、該第3光路に設定された所定の区間に対して所定の位相変調電圧を印加して、伝搬される信号光の位相変調を行う第1位相変調電圧印加手段と、を備え、前記第3光路に対して単一方向の成分だけを有する直線偏波状態の信号光を入射し、その信号光に対して位相変調及び偏波スクランブルを一括して行い前記偏波スクランブラの第1合波手段から出射する構成とする。

【0022】かかる構成によれば、第3光路に入射された信号光は、まず、その第3光路を伝搬されることにより第1位相変調電圧手段によって位相変調される。そして、位相変調された信号光が、第1分岐手段、第1、2光路及び第1合波手段を伝搬されることにより偏波スクランブルが行われるようになる。請求項7に記載の発明では、請求項1～5のいずれか1つに記載の偏波スクランブラを用いた光集積回路であって、入射される信号光を2つに分岐する第2分岐手段と、電気光学効果を有する材料で形成され、前記第2分岐手段で分岐された一方の信号光が伝搬される第4光路と、電気光学効果を有する材料で形成され、前記第2分岐手段で分岐された他方の信号光が伝搬される第5光路と、前記第4光路及び前記第5光路にそれぞれ設定された所定の区間のうちの少なくとも一方の光路の区間に対し、所定の強度変調電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相変調を行う第1強度変調電圧印加手段と、出力側端部が前記偏波スクランブラの第1分岐手段の入力側端部に接合し、前記第4光路及び前記第5光路を伝搬された各信号光を合波して前記第1分岐手段に出力する第2合波手段と、を備え、前記第4光路及び前記第5光路に対して単一方向の成分だけを有する直線偏波状態の信号光を前記第2分岐手段に入射し、その信号光に対して強度変調及び偏波スクランブルを一括して行い前記偏波スクランブラの第1合波手段から出射する構成とする。

【0023】かかる構成によれば、第2分岐部に入射された信号光は、第4、5光路に分岐されそれぞれを伝搬し、第1強度変調電圧印加手段によって位相変調され、第2合波手段で合波されることで強度変調される。そして、強度変調された信号光が、第1分岐手段、第1、2光路及び第1合波手段を伝搬されることにより偏波スクランブルが行われるようになる。

【0024】請求項8に記載の発明は、電気光学効果を有する材料で形成され、信号光が伝搬される1つの光路、及び該光路に設定された所定の区間に対して所定の位相変調電圧を印加して、伝搬される信号光の位相変調を行う位相変調電圧印加手段を有する位相変調手段と、電気光学効果を有する材料で形成され、信号光が伝搬される1つの光路、及び該光路に設定された所定の区間に対して、所定の電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相を変化させる電圧印加手段を有する偏波スクランブル手段と、前記位相変調手段の出力側端部と前

記偏波スクランブル手段の入力側端部とを接続し、前記位相変調手段の光路を伝搬された信号光の偏波を回転させて、前記偏波スクランブル手段の光路に対し2つの方向の成分を有する偏波状態の信号光を出力する第1の偏波面回転手段と、を備えて構成される。

【0025】かかる構成によれば、位相変調手段の光路に入射された信号光は、まず、その光路を伝搬されることにより位相変調電圧印加手段によって位相変調される。そして、位相変調された信号光は、第1の偏波面回転手段でその偏波が回転されて2つの方向の成分を有する偏波状態となる。その信号光が、偏波スクランブル手段の光路を伝搬されることにより電圧印加手段によって偏波スクランブルが行われるようになる。

【0026】請求項9に記載の発明では、請求項8に記載の発明の具体的な構成として、前記位相変調手段と前記偏波スクランブル手段とに対し共通に電圧を印加する電極を備えるものとする。請求項10に記載の発明は、入射される信号光を2つに分岐する分岐手段、電気光学効果を有する材料で形成され、前記分岐手段で分岐された一方の信号光が伝搬される第1光路、電気光学効果を有する材料で形成され、前記分岐手段で分岐された他方の信号光が伝搬される第2光路、前記第1光路及び前記第2光路にそれぞれ設定された所定の区間のうちの少なくとも一方の光路の区間に対し、所定の強度変調電圧を印加して、その区間を伝搬される前記信号光の位相変調を行う強度変調電圧印加手段、及び前記第1光路及び前記第2光路をそれぞれ伝搬された各信号光を合波する合波手段を有する強度変調手段と、電気光学効果を有する材料で形成され、信号光が伝搬される1つの光路、及び該光路に設定された所定の区間に対して、所定の電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相を変化させる電圧印加手段を有する偏波スクランブル手段と、前記強度変調手段の出力側端部と前記偏波スクランブル手段の入力側端部とを接続し、前記強度変調手段の合波手段から出力された信号光の偏波を回転させて、前記偏波スクランブル手段の光路に対し2つの方向の成分を有する偏波状態の信号光を出力する第1の偏波面回転手段と、を備え、前記強度変調手段の分岐手段に単一方向の成分だけを有する直線偏波状態の信号光を入射し、その信号光に対して強度変調及び偏波スクランブルを一括して行い前記偏波スクランブル手段から出射する構成とする。

【0027】かかる構成によれば、強度変調手段の分岐手段に入射された信号光は、第1、2光路に分岐されそれぞれを伝搬し、強度変調電圧印加手段によって位相変調され、合波手段で合波されることで強度変調される。そして、強度変調された信号光は、第1の偏波面回転手段でその偏波が回転されて2つの方向の成分を有する偏波状態となり、偏波スクランブル手段の光路を伝搬されることにより電圧印加手段によって偏波スクランブルが

行われるようになる。

【0028】請求項11に記載の発明では、請求項8～10のいずれか1つに記載の発明において、前記偏波スクランブル手段から出射された信号光の偏波を略90度回転させる第2の偏波面回転手段と、該前記偏波面回転手段から出力された信号光が伝搬される、電気光学効果を有する材料で形成された1つの光路、及び該光路に設定された所定の区間に対して、所定の電圧を印加して、その区間を伝搬される信号光の位相を変化させる電圧印加手段を有する補償用偏波スクランブル手段と、を備え、該補償用偏波スクランブル手段により前記偏波スクランブル手段で発生した偏波分散を補償する構成とする。

【0029】かかる構成によれば、偏波スクランブル手段より出射された信号光は、第2の偏波面回転手段によってその偏波が略90度回転されて、補償用偏波スクランブル手段の光路に対する2つの方向の成分が互いに交換される。その信号光が補償用偏波スクランブル手段の光路を伝搬されることにより、その電圧印加手段によって偏波分散が相殺されるように偏波状態が変化される。

【0030】

【発明の実施の形態】以下、本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。図1は、第1の実施形態の偏波スクランブラの構成を示す平面図である。図1において、本偏波スクランブラは、基板K上にマッハ・ツェンダー

(Mach-Zehnder: 以下MZとする) 形に形成された光導波路1と、基板K上に設けられた所定の形状の第1電圧印加手段としての電極パターン2と、光導波路1の所定の位置に挿入された第1回転子としての偏波面回転素子3とから構成される。また、以下では、偏波スクランブラに対して直交座標系を設定し、信号光の伝搬方向をz軸、基板K面内で信号光の伝搬方向に垂直な方向をx軸、基板K面に垂直な方向をy軸とする。

【0031】光導波路1は、電気光学効果を有する、例えば、ニオブ酸リチウム(LN)等を材料として形成される。この光導波路1は、入射光を2分岐する第1分岐手段としての分岐部10と、2分岐された各光信号が伝搬される第1光路11及び第2光路12と、これら各第1、2光路11、12からの信号光を合波する第1合波手段としての合波部13とからなる。

【0032】電極パターン2は、例えば、第1光路11に電界を印加して光屈折率を変化させ光の位相変調を行うための第1電極2Aと、第2電極2Bとを有する。第1電極2Aは、コ字形のパターンで1辺20aが第1光路11に沿うよう基板K上に配置される。第2電極2Bは、矩形のパターンで周辺部が所定の間隔を隔て第1電極2Aに囲まれるように基板K上に配置される。第1電極2Aには後述する所定の波形の変調電圧が印加され、第2電極2Bは接地される。尚、電極パターン2は、ここではマイクロストリップ線路に類似したもの(非対称



コプレーナストリップ線路)を用いたが、これに限らず、例えば図2に示すような、コプレーナストリップ線路を用いても良い。

【0033】上記の光導波路1と電極パターン2とを組み合わせたものは、一般に用いられているLN型光変調器と同様の構成である。偏波面回転素子3は、入射された信号光の偏波を一方に略90度回転して出力する回転子である。回転角は90度に限定されるものではなく、90度を中心とした角度、具体的には、 $90 \pm 10$ 度程度とすれば良い。この偏波面回転素子3は、例えば、第1光路11の途中に挿入される。その挿入位置は、電極パターン2と合波部13のと間とする。また、挿入方法としては、例えば、予め形成された光導波路1に単体の偏波面回転素子3を挿入する、若しくは、光導\*

$$(x, y) = (0, \cos \omega t) \text{ または } (0, \sin \omega t) \cdots (1)$$

ただし、 $\omega$ は角周波数、 $t$ は時間とする。以下では

( $0, \cos \omega t$ )とした場合についての説明するが、( $0, \sin \omega t$ )とした場合もこれと同様に考えることができる。この信号光は、分岐部10で第1光路11と第2光路12とに分岐される。分岐された各信号光のパワーは、それぞれ入射光のパワーの $1/2$ となる。また、各々の信号光の偏波状態は、図3中の位置(b)に示すように、入射時と同様の垂直直線偏波であり、光パワーは、その電界の2乗に比例するために、上記

(1)と同様に記述すると両信号光共に次のようになる。

#### 【0036】

$$(x, y) = (0, (1/2)^{1/2} \cos \omega t) \cdots (2)$$

次に、各信号光が電極パターン2の設けられた第1光路11及び第2光路12を伝搬することで位相変調が行われる。これは、電極パターン2に印加される変調電圧に応じて光導波路の光屈折率が変化し、第1、2光路11、12を進行する各信号光の速度が互いに異なるようになるために、各信号光間に位相差が生じる。この第1光路11を伝搬した信号光の電界を $E_1$ とし、また、第2光路12を伝搬した信号光の電界を $E_2$ とすると、電\*

$$\begin{aligned} \text{第1光路側 } (x, y) &= (0, (1/2)^{1/2} \cos \omega t) \quad [\Delta \phi = 0] \\ &= (0, (1/2)^{1/2} \cos \omega t) \quad [\Delta \phi = \pi] \cdots (3) \\ \text{第2光路側 } (x, y) &= (0, (1/2)^{1/2} \cos \omega t) \quad [\Delta \phi = 0 \sim \pi] \end{aligned}$$

そして、位相変調された各信号光のうちの第1光路11側の信号光が、偏波面回転素子3に入力され、その偏波が略90度回転される。一般に偏波を $\alpha$ 度回転させる変換は次の数1で示される行列 $R(\alpha)$ で表すことができる。

#### 【0039】

★

$$\begin{aligned} (x, y) &= (-(1/2)^{1/2} \cos \omega t, 0) \quad [\Delta \phi = 0] \\ &= ((1/2)^{1/2} \cos \omega t, 0) \quad [\Delta \phi = \pi] \cdots (4) \end{aligned}$$

次に、偏波面回転素子3を通った信号光と、第2光路12を通った信号光とが合波部13で合波されて出力される。合波された信号光の偏波状態は、図3(e)に示す

\*波路1と偏波面回転素子3とを一体で形成するなどの方法が考えられる。

【0034】次に、第1の実施形態の作用について説明する。まず、図示されない光送信機等から発信された信号光が光導波路1の分岐部10に入射される。このとき入射される信号光は、例えば、図3中の位置(a)のベクトルで示すように、偏波状態が垂直直線偏波(y軸方向)となるように制御される。ただし、図3では、光導波路1の各位置に対応した信号光の偏波状態がxy平面についてベクトル表示されている。この入射光の偏波状態をその電界の水平成分(x軸方向)及び垂直成分(y軸方向)を用いて次のように記述する。

#### 【0035】

※界 $E_1$ 、 $E_2$ は、それぞれの位相を $\phi_1$ 、 $\phi_2$ として、次のように表される。

#### 【0037】

$E_1 = \cos(\omega t + \phi_1)$ 、 $E_2 = \cos(\omega t - \phi_2)$   
各電界間の位相差 $\Delta \phi (= \phi_1 - \phi_2)$ は、上述したように印加される変調電圧に比例する。その変調電圧は、位相差 $\Delta \phi$ が実質的に $0 \sim \pi$ の範囲で周期的に変化するように設定される。ここでは、例えば、正弦波の変調電圧が電極パターン2に印加されて、位相差 $\Delta \phi$ が $0.768 \pi \sin \omega r t$  ( $\omega r$ は繰り返し周波数)で周期的に変調される。具体的には、第1電極2Aに印加される変調電圧に応じて第1光路11を伝搬する信号光の位相が変化し、第2光路12を伝搬する信号光の位相は第2電極2Bが接地されているので略一定となる。図3中の位置(c)には、位相変調された後の各信号光の偏波状態を示す。ただし、第1光路11側の信号光の偏波状態については、実質的な位相差 $\Delta \phi$ が0または $\pi$ となった時の状態が図示され、以下同様とする。この偏波状態を記述すると次のようになる。

#### 【0038】

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix}$$

【0040】図3中の位置(d)に偏波面回転素子3から出力される信号光の偏波状態を表示する。また、この時の状態を記述すると次のようになる。

ように、位相差 $\Delta \phi = 0$ の時、x軸と偏波のなす角 $\theta$ が135度の直線偏波となり、位相差 $\Delta \phi = \pi$ の時、x軸と偏波のなす角 $\theta$ が45度の直線偏波となる。この偏波

状態を記述すると次のようになる。

$$\begin{aligned}(x, y) &= (-1/2\cos\omega t, 1/2\cos\omega t) [\Delta\phi=0] \\ &= (1/2\cos\omega t, 1/2\cos\omega t) [\Delta\phi=\pi] \cdots (5)\end{aligned}$$

このようにして光送信機等から発信された信号光の偏波スクランブルが行われる。この場合、偏波スクランブラで発生する偏波分散は、偏波面回転素子3から合波部23の出射端までの間に限られる。即ち、合波部10、第1光路11及び第2光路12では、伝搬する信号光が同一方向(y軸方向)成分だけであって偏波分散が殆ど発生せず、偏波面回転素子3から合波部23の出射端までの間でのみ信号光がx、y軸成分を持つため偏波分散が発生する。従って、入射光が45度入力される(即ちx、y成分を持つ)位相変調器を用いた従来の偏波スクランブラと比較して、光路長を同等とした場合に、発生する偏波分散を約1/3以下に低減することができる。

【0042】上述のように第1の実施形態によれば、一般的なLN型光変調器と同様の構成の光導波路1に偏波面回転素子3を設けたことによって、簡略な構成で偏波分散の小さい偏波スクランブラを提供することができる。特に、光導波路1と偏波面回転素子3との一体形成を可能とすれば、従来のLN型光変調器と殆ど同じ工程で偏波スクランブラを生産できるようになる。

【0043】次に、第2の実施形態について説明する。第2の実施形態では、第1の実施形態の構成における偏波面回転素子3の挿入位置を第1光路11側から第2光路12側に代えたものである。図4は、第2の実施形態の構成及び信号光の偏波状態を示す図である。図4において、本偏波スクランブラが第1の実施形態の構成と異なる部分は、具体的には、偏波面回転素子3が、分岐部13と電極パターン2との間の第2光路12に挿入されている部分である。偏波面回転素子3自体は、第1の実

$$\begin{aligned}(x, y) &= (-1/2\cos\omega t, 1/2\cos\omega t) [\Delta\phi=0] \\ &= (-1/2\cos\omega t, -1/2\cos\omega t) [\Delta\phi=\pi] \cdots (5)'\end{aligned}$$

このように第2の実施形態によれば、偏波面回転素子3を第2光路12側に挿入した構成においても、第1の実施形態と同様の効果を得ることができる。次に、第3の実施形態について説明する。

【0047】第3の実施形態では、第1、2の実施形態の構成における偏波面回転素子3に代えて、2つの偏波面回転素子31、32を第1光路11側及び第2光路12側にそれぞれ設けたことを特徴とする。図5は、第3の実施形態の構成及び信号光の偏波状態を示す図である。図5において、本偏波スクランブラは、第1の実施形態で偏波面回転素子3を挿入した位置に第2回転子としての偏波面回転素子31を設け、また、第2の実施形態で偏波面回転素子3を挿入した位置に第3回転子としての偏波面回転素子32を設けた構成である。その他の構成は、第1、2の実施形態の構成と同様であるため説明を省略する。

【0048】偏波面回転素子31は、第1光路11の電

【0041】

\*施形態で用いたものと同一であり、挿入位置のみが異なる。その他の構成については、第1の実施形態の構成と同様であるため説明を省略する。尚、電極パターン2が図示されたマイクロストリップ線路タイプに限らず、コプレーナストリップ線路(図2参照)を用いても良いことについても第1実施形態と同様である。

10 【0044】ここで、第2の実施形態の作用を説明する。本偏波スクランブラでは、信号光が分岐部10に入射されてから第1光路11及び第2光路12で位相変調されるまでの作用は第1の実施形態の作用と同様であり、各位置での偏波状態は、図4中の位置(a)～(c)にベクトル表示され、その状態を記述したものは、上述した偏波状態の記述(1)～(3)と同一である。

【0045】第2光路12の電極パターン2下を通った垂直直線偏波の信号光は、偏波面回転素子3に入力して、その偏波が略90度回転される。この時の偏波状態は、図4中の位置(d)に示され、また、次のように記述される。 $(x, y) = (-1/2)^{1/2} \cos\omega t, 0)$   
 $[\Delta\phi=0\sim\pi] \cdots (4)'$ そして、第1光路11を通った信号光と、偏波面回転素子3を通った信号光とが合波部13で合波されて出力される。合波された信号光の偏波状態は、図4中の位置(e)に示すように、位相差 $\Delta\phi=0$ の時、x軸と偏波のなす角 $\theta$ が135度の直線偏波となり、位相差 $\Delta\phi=\pi$ の時、x軸と偏波のなす角 $\theta$ が225度の直線偏波となる。この偏波状態を記述すると次のようになる。

【0046】

極パターン2下を通った信号光が入力されて、その偏波を略45度回転して出力するものである。また、偏波面回転素子32は、第1光路12の電極パターン2下を通った信号光が入力されて、その偏波を略-45度回転して出力するものである。各偏波面回転素子31、32の回転角は、45度、-45度に限定されるものではなく、2つの回転素子による相対的な回転角が90度を中心とした角度、具体的には、 $90\pm10$ 度程度であれば良い。また、各偏波面回転素子31、32の光導波路2への挿入方法は、上述の偏波面回転素子3の場合と同様である。

【0049】ここで、第3の実施形態の作用を説明する。本偏波スクランブラでも、信号光が分岐部10に入射されてから第1光路11及び第2光路12で位相変調されるまでの作用は第1の実施形態の作用と同様であり、各位置での偏波状態は、図5中の位置(a)～(c)にベクトル表示され、その状態を記述したもの



は、上述した偏波状態の記述(1)～(3)と同一である。

【0050】第1光路11の電極パターン2下を通った信号光は、偏波面回転素子31に入力して、その偏波が\*

$$\begin{aligned}(x, y) &= (-1/2\cos\omega t, 1/2\cos\omega t) [\Delta\phi=0] \\ &= (1/2\cos\omega t, -1/2\cos\omega t) [\Delta\phi=\pi] \cdots (4.1)\end{aligned}$$

また、第2光路12の電極パターン2下を通った信号光は、偏波面回転素子32に入力して、その偏波が略-45度回転される(前述の行列R( $\alpha=-45$ )に従う)。\*

$$(x, y) = (1/2\cos\omega t, 1/2\cos\omega t) [\Delta\phi=0\sim\pi] \cdots (4.2)$$

そして、各偏波面回転素子31, 32を通った信号光が合波部13で合波されて出力される。合波された信号光の偏波状態は、図5中の位置(e)に示すように、位相差 $\Delta\phi=0$ の時、x軸と偏波のなす角 $\theta$ が90度の直線★

$$\begin{aligned}(x, y) &= (0, \cos\omega t) \\ &= (\cos\omega t, 0)\end{aligned}$$

このようにして光送信機等から発信された信号光の偏波スクランブルが行われ、また、第1, 2の実施形態と同様に、偏波分散の発生を低減することができる。更に、第3の実施形態の構成によれば、第1光路11側と第2光路側とが対称的な構成となつて、偏波面回転素子の挿入による影響(光の損失等)が各光路側で略等しくなるため、合波された信号光の伝送特性を向上させることも可能である。

【0053】次に、第4の実施形態について説明する。第4の実施形態では、第1～3の実施形態の構成における電極パターン2に代えて、形状の異なる電極パターン2'を設けたことを特徴とする。図6は、第4の実施形態の構成を示す図である。図6において、本偏波スクランブラの電極パターン2'は、電極パターン2と異なり、4つの電極21A, 21B, 22A, 22Bから成る。電極パターン2'以外の構成は第1の実施形態の構成と同様であるため説明を省略する。

【0054】電極21Aは、コ字形のパターンで1辺21aが第1光路11に沿うよう基板K上に配置され、電極21Bは、矩形のパターンで周辺部が所定の間隔を隔て電極21Aに囲まれるように基板K上に配置される。また、これと対称的に、電極22Aは、コ字形のパターンで1辺22aが第2光路12に沿うよう基板K上に配置され、電極22Bは、矩形のパターンで周辺部が所定の間隔を隔て電極22Aに囲まれるように基板K上に配置される。電極21A, 22Aには、上述した変調電圧と波形が同様で電圧振幅が1/2の変調電圧が互いに逆相の関係で印加され、電極21B, 22Bは接地される。

【0055】ここで、第4の実施形態の作用を説明する。本偏波スクランブラでは、信号光が分岐部10に入射されてから第1光路11及び第2光路12に分岐されるまでの作用は第1～3の実施形態の作用と同様であるが、各光路で行われる位相変調が第1～3の実施形態の

\*略45度回転される(前述の行列R( $\alpha=45$ )に従う)。この時の偏波状態は、図5中の位置(d)に示され、また、次のように記述される。

\*この時の偏波状態は、図5中の位置(d)に示され、また、次のように記述される。

【0051】

★偏波となり、位相差 $\Delta\phi=\pi$ の時、x軸と偏波のなす角 $\theta$ が0度の直線偏波となる。この偏波状態を記述すると次のようになる。

【0052】

$$\begin{aligned}[\Delta\phi=0] \\ [\Delta\phi=\pi] \cdots (5)''\end{aligned}$$

位相変調とは異なってくる。本実施形態により位相変調された信号光の偏波状態を単にxy平面のベクトルで表すことは困難であるため、ここでは各偏波状態をその電界のxy成分を用いて記述してその作用を説明する。

【0056】図7には、光導波路1の各位置での偏波状態の変化を示す。ただし、位置(a)～(e)は図6で対応する符号が付された位置を示すものである。図7において、本偏波スクランブラに入射される信号光の偏波状態、及び分岐部10で各光路に分岐された信号光の偏波状態は、上述の記述(1)及び記述(2)と同一である。次に、本実施形態では、第1光路11及び第2光路の双方に変調電圧が印加されるため、各々の光路を通る信号光の位相が変化する。電極パターン2'下を通った後の各信号光の偏波状態を記述すると、図7中の位置

(c)のようになる。そして、第1の実施形態と同様に、第1光路11側の信号光が偏波面回転素子3に入力して偏波が略90度回転される。その偏波状態は図7中の位置(d)のようになる。各光路を通過した信号光は合波部13で合波されて出力される。合波された信号光の偏波状態は、図7中の位置(e)に示すように、位相差 $\Delta\phi=0$ の時、x軸と偏波のなす角 $\theta$ が135度の直線偏波となり、位相差 $\Delta\phi=\pi$ の時、x軸と偏波のなす角 $\theta$ が225度の直線偏波となる。

【0057】このように第4の実施形態によれば、電極パターン2'を用いることによって、第1の実施形態と同様の効果が得られるのに加えて、印加される変調電圧の振幅を、第1の実施形態の場合と比較して1/2にできるため、本偏波スクランブラの低消費電力化を図ることができる。尚、図6では、偏波面回転素子3が、第1の実施形態の構成(図1)と同様に、第1光路11側に挿入される構成としたが、本実施形態の電極パターン2'が適用される構成はこれに限られるものではない。例えば、図8(A)に示すように、第2の実施形態の構成と同様、偏波面回転素子3が第2光路12側に挿入さ

れる構成や、図8(B)に示すように、第3の実施形態の構成と同様、偏波面回転素子31、32が第1、2光路11、12それぞれに挿入される構成としても良い。これらの構成としたときの作用も、上記の第4の実施形態の作用と同様にして考えることができる。ここでは、図8(A)の構成における各偏波状態を記述したものを図9(A)に示し、図8(B)の構成における各偏波状態を記述したものを図9(B)に示す。

【0058】次に、第5の実施形態について説明する。第5の実施形態は、請求項6に記載の発明の一実施形態であって、例えば、第2の実施形態の偏波スクランブラに位相変調機能を付加して、位相変調と偏波スクランブルとを同時に実現できるようにした光集積回路である。図10は、第5の実施形態の構成を示す図である。

【0059】図10において、本光集積回路が第2の実施形態の偏波スクランブラの構成と異なる部分は、光導波路1に代えて、第3光路としての位相変調部14を付加した光導波路1'を用い、また、電極パターン2の形状を位相変調部14に合わせて変形させた電極パターン2''を設けた部分である。その他の構成は第2の実施形態の構成と同様であるため説明を省略する。

【0060】光導波路1'は、上述した光導波路1の分岐部10の入力側端部に、所定の長さを有する光導波路である位相変調部14を接合したものである。この位相変調部14には、分岐部10、第1、2光路11、12及び分岐部13と同一の電気光学効果を有する材料(LN等)が用いられ、光導波路1'全体が一体で形成される。

【0061】電極パターン2''は、位相変調部14、分岐部10及び第1光路11に電界を印加して光屈折率を変化させ光の位相変調を行うための第1電極2A'と、第2電極2B'とを有する。第1電極2A'は、略コ字形のパターンで1辺20a'が位相変調部14、分岐部10及び第1光路11に沿うよう基板K上に配置される。また、第2電極2B'は、略矩形のパターンで周辺部が所定の間隔を隔て第1電極2A'に囲まれるように基板K上に配置される。第1電極2A'には第2の実施形態と同様の変調電圧が印加され、第2電極は接地される。位相変調部14を通る信号光の位相変調量は、第1電極2A'の位相変調部14に沿う部分の長さによって変化する。このため、その部分の長さは偏波スクランブルと同時に進行する位相変調に必要な位相変化量に応じて適宜に設定される。このように電極パターン2''は、第1位相変調電圧印加手段及び第1電圧印加手段として機能する。尚、ここではマイクロストリップ線路タイプとしたが、コプレーナストリップ線路を用いても構わない。

【0062】本光集積回路には、光送信機等から発信された信号光が垂直直線偏波に制御され、光導波路1'に入射される。その入射された信号光は位相変調部14で位相変調される。ここで行われる位相変調は、従来の位

相変調器の動作と同様であるため説明を省略する。位相変調された信号光は、第2の実施形態の場合と同様に、分岐部10で第1光路11と第2光路12とに分岐され、第1光路11で位相変調された信号光と第2光路12及び偏波面回転素子を通った信号光が合波部13で合波されて偏波スクランブルが行われる。

【0063】このように第5の実施形態によれば、位相変調機能と偏波スクランブル機能とを集積化した光集積回路を構成することによって、偏波スクランブルによる信号光のスペクトル拡散等を低減するために従来提案された、位相変調及び偏波スクランブルを組み合わせて行う手段を容易に実現することができる。本光集積回路を用いることにより、従来のように位相変調器と偏波スクランブラと個別に接続するのと比較して、光結合箇所が減り結合損失が減少するので送信光の光SNRが改善され、また、各機器間を接続する際の位相調整が不必要となり、部品点数やスプライス等の組み立て工数が低減され、高額部品(例えば、バンダカプラ等)を用いる必要性も低くなるためコストの低減を図ることができる。加えて、集積化により各部品間を接続する光ファイバが不要になるため小型化を図ることも可能である。

【0064】尚、上記第5の実施形態では、偏波面回転素子3を第2光路12側に設ける構成としたが、第1の実施形態と同様に第1光路11側に偏波面回転素子3を設ける構成や、第3の実施形態と同様に第1、2光路11、12両側にそれぞれ偏波面回転素子31、32を設ける構成であっても構わない。次に、第6の実施形態について説明する。

【0065】第6の実施形態は、請求項8及び9に記載の発明の一実施形態であって、従来のストレートライン型の偏波スクランブラ(図19)と位相変調器とを集積化した光集積回路である。図11は、第6の実施形態の構成を示す図である。図11において、本光集積回路は、基板Kに形成されたストレートライン形状の光導波路5と、基板K上に設けられた所定の形状の電極パターン6と、光導波路5の中央部分に挿入され、入力光の偏波を略45度回転する第1の偏波面回転手段としての偏波面回転素子31(第3の実施形態で用いたものと同様)とから構成される。

【0066】光導波路5は、上述の光導波路1等と同様に、電気光学効果を有する材料(LN等)を材料として形成される。その中央部分の所定位置には偏波面回転素子31が挿入される。この光導波路5は、位相変調手段の光路及び偏波スクランブル手段の光路として機能する。電極パターン6は、第1電極6Aと第2電極6Bとを有する。第1電極6Aは、コ字形のパターンで1辺6aが光導波路5に沿うよう基板K上に配置される。また、1辺6aは、入射側の端部から偏波面回転素子32上に位置する部分までの長さが位相変調に要する印加電圧に応じて設定され、偏波面回転素子32上に位置する

部分から出射側の端部までの長さが偏波スクランブルに要する印加電圧に応じて設定される。第2電極6Bは、矩形的パターンで周辺部が所定の間隔を隔て第1電極6Aに囲まれるように基板K上に配置される。第1電極6Aには、従来の偏波スクランブラで用いられていたのと同様の変調電圧が印加され、第2電極6Bは接地される。このように電極パターン6は位相変調電圧印加手段及び電圧印加手段として機能する。尚、ここではマイクロストリップ線路タイプとしたが、コプレーナストリップ線路を用いても構わない。

【0067】このような構成の光集積回路には、光送信機等から発信された信号光が垂直直線偏波（y軸方向）に制御され入射される。その入射された信号光は光導波路5中を偏波面回転素子31まで伝搬する間に位相変調される。この位相変調動作は従来の位相変調器の動作と同様である。位相変調された信号光は、偏波面回転素子31に入力してその偏波が略45度回転される。これにより偏波面回転素子31を通過した信号光はx成分及びy成分を有する状態となる。この状態は、従来の偏波スクランブラに直線偏波の信号光を方位角略45度で入力したのと同様となる。従って、信号光が偏波面回転素子31以降の光導波路5を伝搬することで、偏波スクランブルが行われる。

【0068】上述のように第6の実施形態によれば、ストレートライン型的光変調器の光導波路31の途中で偏波面回転素子31が挿入された構成の光集積回路とすることによって、第5の実施形態と同様に、簡略な構成の光集積回路で位相変調及び偏波スクランブルを同時に行うことが可能である。ただし、本実施形態における偏波スクランブル機能は、従来の偏波スクランブラと同等であるため偏波分散の発生を低減する効果はなく、この点に関しては第5の実施形態の構成の方が優れているが、位相変調と偏波スクランブルを行うための電圧印加を1つの電極で行える点でメリットが有る。

【0069】次に、第7の実施形態について説明する。第7の実施形態は、請求項7に記載の発明の一実施形態であって、例えば、第1の実施形態の偏波スクランブラに強度変調機能を付加して、強度変調と偏波スクランブルとを同時に実現できるようにした光集積回路である。図12は、第7の実施形態の構成を示す図である。

【0070】図12において、本光集積回路は、第1の実施形態の構成と同一の構成の偏波スクランブル部PMと、その入射端側に接合する強度変調部IMとから構成される。強度変調部IMは、従来より一般に用いられているLN型光変調器と同一の構成であって、その光導波路の出射端が偏波スクランブル部PMの光導波路の入射端に接合されたものである。この強度変調部IMは、偏波面回転素子3が挿入されていない状態の偏波スクランブル部PMと同じ構成で、光導波路1に対応する光導波路71及び電極パターン2に対応する電極パターン72

を有し、偏波スクランブル部PMと共に一体に形成される。従って、光導波路71は第2分岐手段、第4、5光路及び第2合波手段として機能し、また、電極パターン72は第1強度変調電圧印加手段として機能する。

【0071】本光集積回路には、光送信機等から発信された信号光が垂直直線偏波（y軸方向）に制御され、強度変調部IMの光導波路71に入射される。その入射された信号光は、電極パターン72より印加される変調電圧に応じて光導波路71中を伝搬する間に強度変調される。この強度変調は、従来のLN型光変調器による強度変調動作と同様であるため説明を省略する。強度変調された垂直直線偏波（y軸方向）の信号光は、偏波スクランブル部PMの光導波路1に移る。偏波スクランブル部PMでは、第1の実施形態の作用と同様にして、強度変調された信号光の偏波スクランブルが行われる。

【0072】このように第7の実施形態によれば、強度変調機能及び偏波スクランブル機能を集積化した光集積回路を構成することによって、偏波スクランブルによる信号光のスペクトル拡散等を低減するために提案された、強度変調及び偏波スクランブルを組み合わせて行う手段を容易に実現することができる。特に、強度変調部IMと偏波スクランブル部PMの構成が類似しているため、その設計及び製作を容易に行うことができる。また、本光集積回路を用いることにより、第5の実施形態で位相変調機能と偏波スクランブル機能を集積化したときの効果と同様、従来のようにLN型光変調器と偏波スクランブラと個別に接続するのと比較して、光結合箇所が減って送信光の光SNRが改善され、また、位相調整の無調整化、部品点数及び組み立て工数の低減、廉価な部品の採用等によりコストの低減を図ることができる。加えて、集積化により小型化を図ることも可能である。

【0073】尚、第7の実施形態では、第1光路11側に偏波面回転素子3が設けられた偏波スクランブル部PMが構成としたが、本発明の光集積回路の構成はこれに限られるものではない。偏波スクランブル部PMとしては、例えば、図13（A）に示すように、第2の実施形態と同様、第2光路12側に偏波面回転素子3を設ける構成や、図13（B）に示すように、第3の実施形態と同様、第1、2光路11、12両側にそれぞれ偏波面回転素子31、32を設ける構成であっても構わない。また、強度変調部IMの電極パターン72に対する偏波スクランブル部PMの電極パターン2の配置は、図13（C）に示すように、第7の実施形態の配置と逆にしても良い。更に、例えば、図14（A）～（C）に示すように、偏波スクランブル部PMの電極パターン2の形状を、第4の実施形態と同様の電極パターン2'とすることも可能である。この場合には、偏波スクランブル部PMの消費電力を低減させることができる。

【0074】次に、第8の実施形態について説明する。第8の実施形態は、請求項10及び11に記載の発明の

一実施形態であって、偏波スクランブル部の構成に従来のストレートライン型の偏波スクランブラを用いて光集積回路を構成し、第7の実施形態と同様に強度変調と偏波スクランブルとを同時に実現できるようにしたものである。

【0075】図15は、第8の実施形態の構成を示す図である。図15において、本光集積回路は、第7の実施形態で用いたものと同様の構成の強度変調手段としての強度変調部IMと、その強度変調部IMの出射端に接合された偏波スクランブル部PM' とから構成される。偏波スクランブル部PM' は、基板K上に形成されたストレートライン型の光導波路81と、基板K上に設けられた所定の形状の2つの電極パターン82、82' と、光導波路81と強度変調部IMとの接合部分に挿入され、入力光の偏波を略45度回転する第1の偏波面回転手段としての偏波面回転素子83（第3の実施形態で用いた偏波面回転素子31と同様）と、光導波路81の中央部分に挿入され偏波を略90度回転する第2の偏波面回転手段としての偏波面回転素子83'（第1の実施形態で用いた偏波面回転素子3と同様）とから構成される。光導波路81は、上述の光導波路1等と同様に、電気光学効果を有する材料（LN等）を材料として形成される。その一端は偏波面回転素子83を介して強度変調部IMの光導波路71の出射端に接合され、また中央部分の所定位置には偏波面回転素子83' が挿入される。

【0076】電極パターン82は、2つの電極82A、82Bとを有する。コ字形をした電極82Aの1辺82aは、偏波面回転素子83、83' 間において光導波路81に沿うよう基板K上に配置される。また、電極82Bは、矩形のパターンで周辺部が所定の間隔を隔て電極82Aに囲まれるように基板K上に配置される。また、電極パターン82' も、電極パターン82と同様の形状で、電極82A' の1辺82a' が偏波面回転素子83' と光導波路81の出射端との間において光導波路81に沿うよう基板K上に配置される。電極82A、82A' には、従来の偏波スクランブラで用いられていたのと同様の変調電圧が印加され、電極82B、82B' は接地される。尚、ここでもマイクロストリップ線路タイプとしたが、コプレーナストリップ線路を用いても構わない。また、各電極パターン82、82' の配置は、上記に限らず、例えば、図16に示すような対称的な配置としても良い。

【0077】このように、光導波路81は、偏波スクランブル手段の光路及び補償用偏波スクランブル手段の光路として機能し、電極パターン82は、偏波スクランブル手段の電圧印加手段として機能し、電極パターン82' は、補償用偏波スクランブル手段の電圧印加手段として機能する。また、偏波面回転素子83は、強度変調手段と偏波スクランブル手段との間を接続する偏波面回転手段として機能し、偏波面回転素子83' は、偏波ス

クランブル手段と補償用偏波スクランブル手段との間を接続する偏波面回転手段として機能する。更に、第7の実施形態と同様の構成の強度変調部IMは、本実施形態では光導波路71が、強度変調手段の分岐手段、第1、2光路及び合波手段として機能し、電極パターン72が、強度変調電圧印加手段として機能する。

【0078】本光集積回路には、第7の実施形態と同様に、光送信機等から発信された信号光が垂直直線偏波（y軸方向）に制御され、強度変調部IMの光導波路71に入射されて強度変調が行われる。強度変調された垂直直線偏波（y軸方向）の信号光は、偏波面回転素子83に輸入されてその偏波が略45度回転される。これにより偏波面回転素子83を通過した信号光はx成分及びy成分を有する状態となる。この信号光のx成分及びy成分が、従来の位相変調器と同様の作用により、電極パターン82下を通過する間に位相変調される。この時、各x、y方向での光屈折率の差異より偏波分散が発生する。この偏波分散を相殺するために、偏波面回転素子83' で信号光の偏波を略90度回転してx成分とy成分の変換を行い、電極パターン82' 下を通過させて上記と同様の位相変調を行う。これにより発生した偏波分散が相殺されると同時に偏波スクランブルが行われる。

【0079】このように第8の実施形態によれば、従来のLN型光変調器と偏波分散を低減する公知の構成のストレートライン型偏波スクランブラとを集積化した光集積回路を構成することによって、第7の実施形態の効果と同様に、簡略な構成の光集積回路で強度変調及び偏波スクランブルを同時に行うことが可能であり、伝送特性の向上、コストの低減及び小型化を図ることができる。

【0080】尚、上述した第1～8の実施形態では、光導波路の材料をニオブ酸リチウム（LN）とした場合について説明したが、本発明の光導波路に用いられる材料はこれに限られるものではなく、電気光学効果を有する材料であれば良い。

【0081】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のうちの請求項1～5のいずれか1つに記載の発明は、第1光路及び第2光路の少なくとも一方に対応する偏波面回転手段を設けたことによって、偏波分散の発生は、信号光が偏波面回転手段を通過した後の部分に限られるようになるため、簡略な構成で偏波分散の小さい偏波スクランブラを実現することができる。特に、第1、2光路に各々第1、2回転子を設けることによって、偏波面回転手段の挿入による影響が各光路側で略等しくなるため、合波された信号光の伝送特性を向上させることも可能である。また、第1、2光路のそれぞれの区間に対して電圧を印加する第1電圧印加手段としたことによって、印加電圧の振幅が小さくなるため、低消費電力化を図ることもできる。

【0082】また、請求項6または7に記載の発明は、

請求項1～5のいずれか1つに記載の効果に加えて、上記の偏波スクランブラに位相変調または強度変調を行う手段を集積化した光集積回路を構成することによって、位相変調と偏波スクランブルまたは強度変調と偏波スクランブルを1つの光集積回路で一括して容易に行うことができるようになり、偏波スクランブルによる信号光のスペクトル拡散等を低減させることができる。更に、従来のように位相変調器と偏波スクランブラと個別に接続するのと比較して、光結合箇所が減り結合損失が減少するので送信光の光S/NRが改善され、また、各機器間を接続する際の位相調整が不要となり、部品点数やスプライス等の組み立て工数が低減され、高額部品を用いる必要性も低くなるためコストの低減を図ることができる。加えて、集積化により各部品間を接続する光ファイバが不要になるため小型化を図ることも可能である。

【0083】請求項8または9に記載の発明は、1つの光路で構成される従来の偏波スクランブラと同様の偏波スクランブル手段に、信号光を位相変調する位相変調手段を第1の偏波面回転手段を介して接続した光集積回路とすることによって、従来の偏波スクランブラの構成を利用した簡略な構成の光集積回路で、位相変調と偏波スクランブルを一括して容易に行うことができ、伝送特性の向上、コストの低減及び小型化を図ることが可能である。

【0084】請求項10に記載の発明は、1つの光路で構成される従来の偏波スクランブラと同様の偏波スクランブル手段に、信号光を強度変調する強度変調手段を第1の偏波面回転手段を介して接続した光集積回路とすることによって、従来の偏波スクランブラの構成を利用した簡略な構成の光集積回路で、強度変調と偏波スクランブルを一括して容易に行うことができ、伝送特性の向上、コストの低減及び小型化を図ることが可能である。

【0085】また、請求項11に記載の発明は、請求項8～10のいずれか1つに記載の発明の効果に加えて、偏波スクランブル手段の後段に、更に信号光の偏波スクランブルを行う補償用偏波スクランブル手段を第2の偏波面回転手段を介して接続した光集積回路とすることによって、偏波スクランブル手段で発生する偏波分散が、補償用偏波スクランブル手段で相殺されるため、伝送特性のより優れた光集積回路を提供することができる。

#### 【図面の簡単な説明】

【図1】本発明の第1の実施形態に係る偏波スクランブラの構成を示す平面図である。

【図2】同上第1の実施形態でコプレーナストリップ線路を用いた場合の例示図である。

【図3】同上第1の実施形態の偏波状態を説明する図である。

【図4】本発明の第2の実施形態に係る偏波スクラン

ラの構成及び偏波状態を示す平面図である。

【図5】本発明の第3の実施形態に係る偏波スクランブラの構成及び偏波状態を示す平面図である。

【図6】本発明の第4の実施形態に係る偏波スクランブラの構成を示す平面図である。

【図7】同上第4の実施形態の偏波状態を記述した図である。

【図8】同上第4の実施形態で偏波面回転素子の配置を変更した場合の例示図である。

【図9】図8に例示した構成における偏波状態を記述した図である。

【図10】本発明の第5の実施形態に係る光集積回路の構成を示す平面図である。

【図11】本発明の第6の実施形態に係る光集積回路の構成を示す平面図である。

【図12】本発明の第7の実施形態に係る光集積回路の構成を示す平面図である。

【図13】同上第7の実施形態で偏波スクランブル部の構成を変更した場合の例示図である。

【図14】同上第7の実施形態で偏波スクランブル部の構成を変更した場合の他の例示図である。

【図15】本発明の第8の実施形態に係る光集積回路の構成を示す平面図である。

【図16】同上第8の実施形態で電極パターンの配置を変更した場合の例示図である。

【図17】従来の強度変調及び偏波スクランブルを同時に行う場合の構成を示すブロック図である。

【図18】従来の強度変調、位相変調及び偏波スクランブルを同時に行う場合の構成を示すブロック図である。

【図19】従来の位相変調器を用いた偏波スクランブラの構成を示す例示図である。

【図20】従来の強度変調と偏波スクランブルとを一括して行う構成を示す例示図である。

#### 【符号の説明】

1, 1', 5, 71, 81 光導波路

2, 2', 2'', 6, 72, 82, 82' 電極パターン

3, 31, 32, 83, 83' 偏波面回転素子

10 分岐部

11 第1光路

12 第2光路

13 合波部

14 位相変調部

2A, 2B, 21A, 21B, 22A, 22B, 2A', 2B', 6A, 6B, 82A, 82B, 82A', 82B'

電極

K 基板

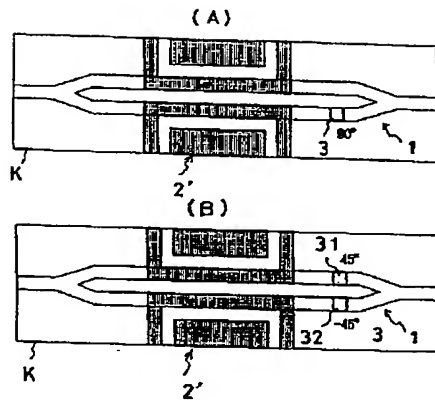
PM 偏波スクランブル部

IM 強度変調部

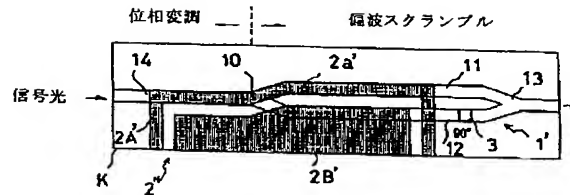




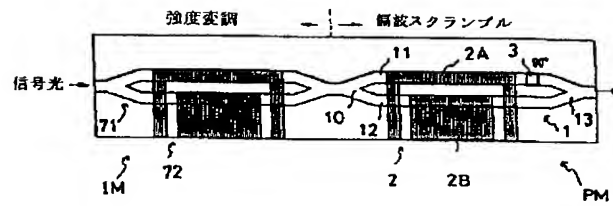
【図8】



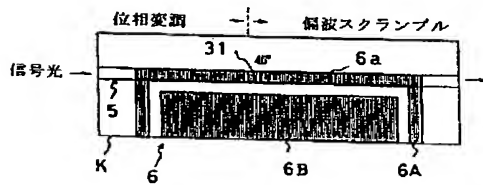
【図10】



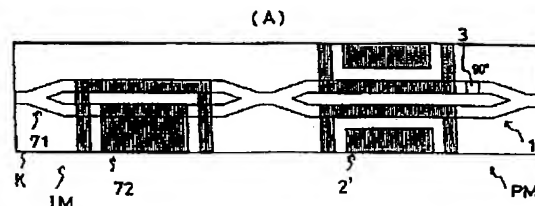
【図12】



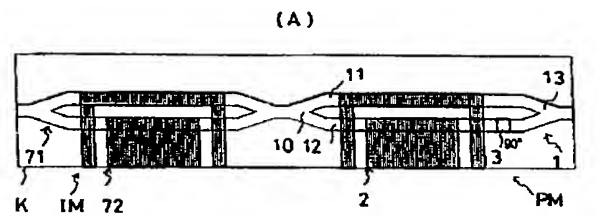
【図11】



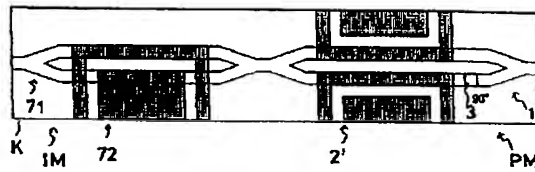
【図14】



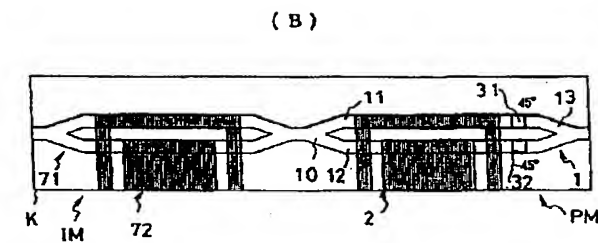
【図13】



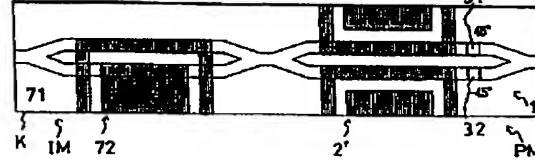
(B)



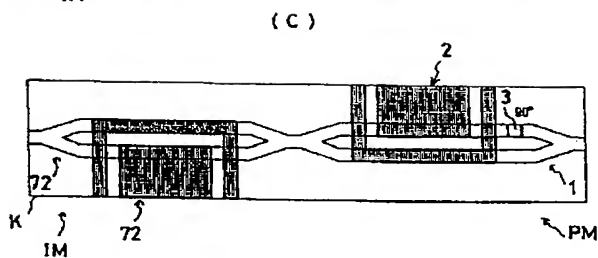
(B)



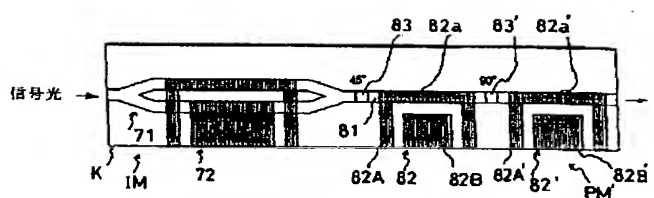
(C)



(C)

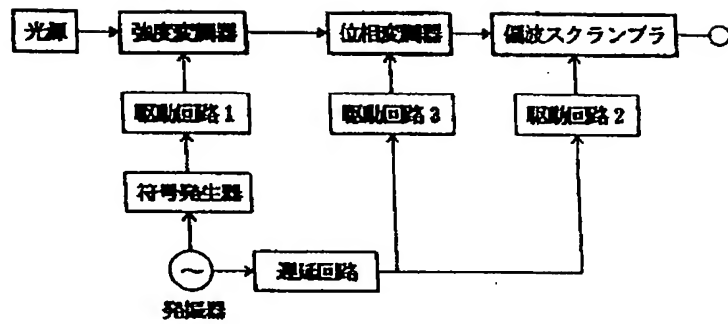


【図15】

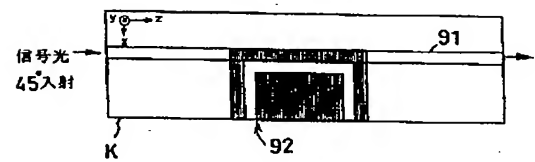




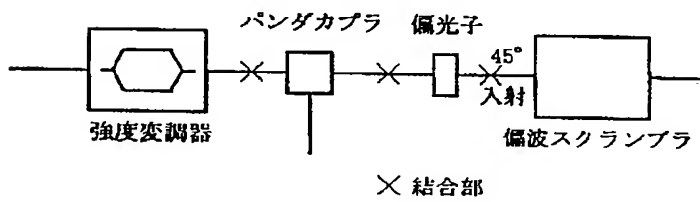
【図18】



【図19】



【図20】



フロントページの続き

(51) Int. Cl.<sup>6</sup>

H 0 4 B 10/152  
10/142  
10/04  
10/06  
10/28

識別記号

F I

H 0 4 B 9/00

U  
W



US005911016A

## United States Patent [19]

Naito

[11] Patent Number: 5,911,016

[45] Date of Patent: Jun. 8, 1999

[54] **POLARIZATION SCRAMBLER AND  
INTEGRATED OPTICAL CIRCUIT MAKING  
USE THEREOF**

5,787,211 7/1998 Gopalakrishnan ..... 385/3

[75] Inventor: Takao Naito, Kawasaki, Japan

[73] Assignee: Fujitsu Limited, Kawasaki, Japan

[21] Appl. No.: 08/921,338

[22] Filed: Aug. 29, 1997

[30] Foreign Application Priority Data

Jan. 28, 1997 [JP] Japan ..... 9-014259

[51] Int. Cl.<sup>6</sup> ..... G02B 6/10

[52] U.S. Cl. .... 385/3; 385/8; 385/9

[58] Field of Search ..... 385/2, 3, 8, 9,  
385/10

[56] References Cited

U.S. PATENT DOCUMENTS

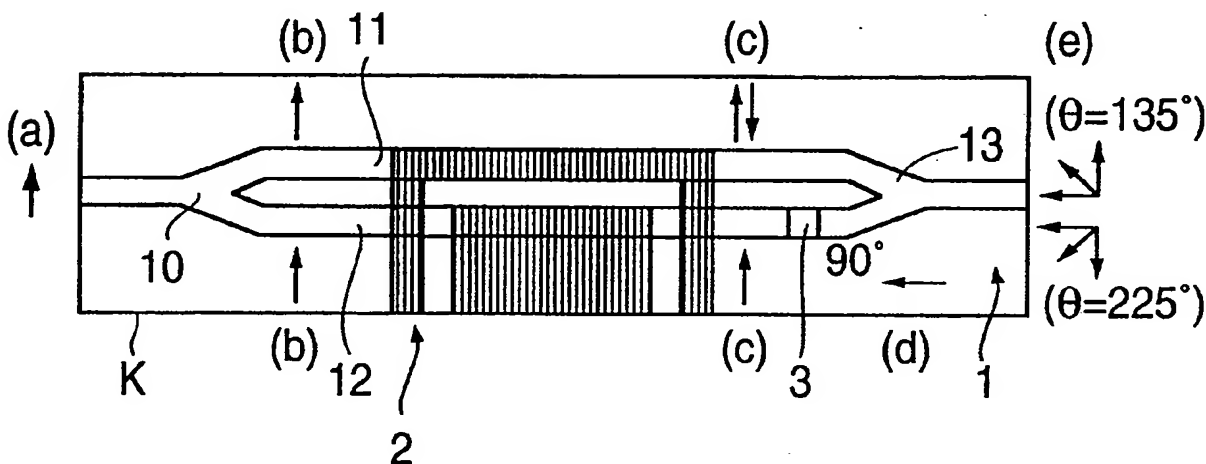
5,748,358 5/1998 Sugamata et al. .... 385/3

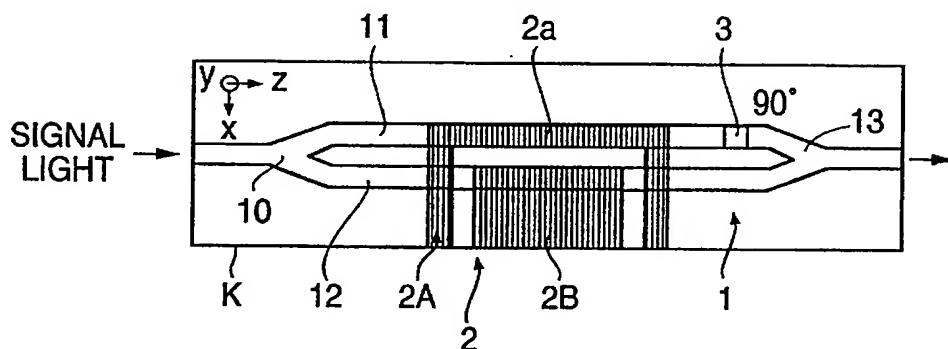
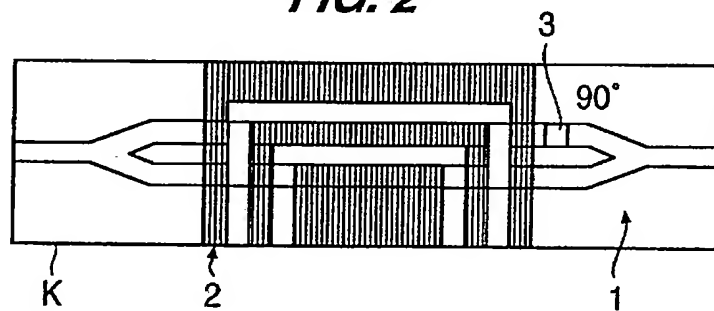
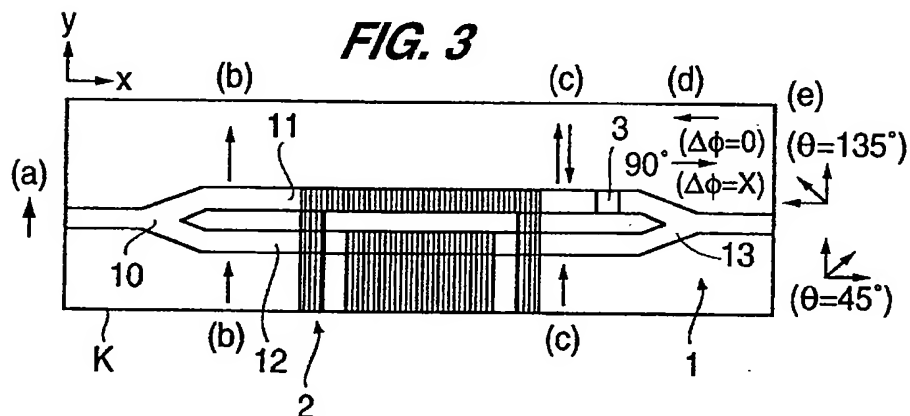
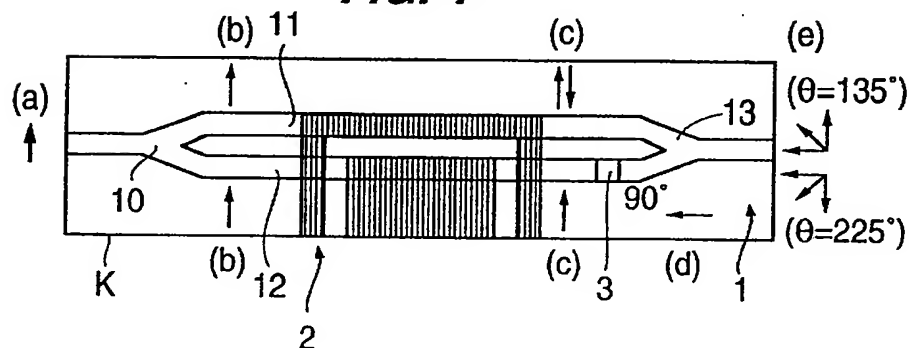
Primary Examiner—Hung N. Ngo  
Attorney, Agent, or Firm—Staas & Halsey

[57] **ABSTRACT**

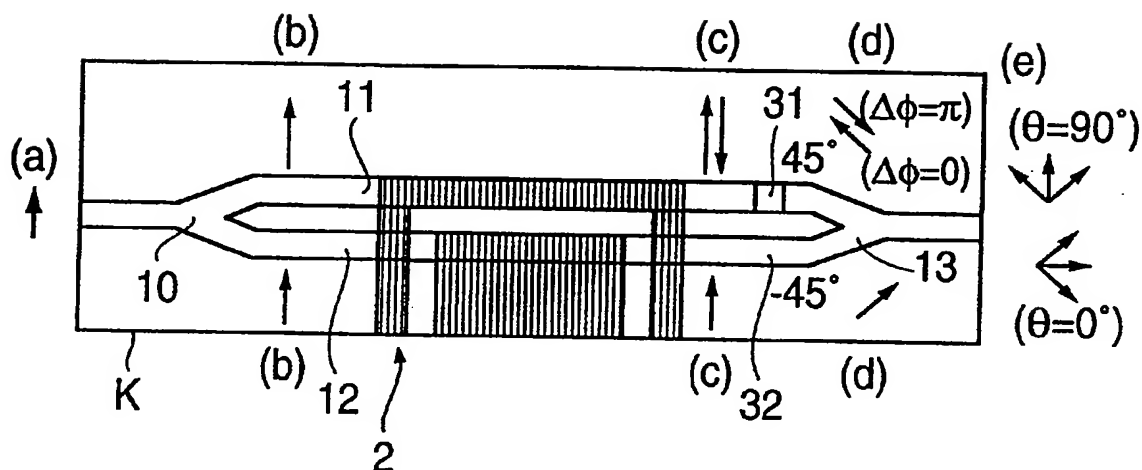
A signal light incident onto a first splitter of a polarization scrambler is split into two and propagated through a first and second optical paths, whereby phases of the signal lights are varied in accordance with a voltage applied by first voltage supplier. Further, a polarization of the signal light propagated through at least one of the first and second optical paths is rotated for adjusting a relative polarization angle between the signal lights by first plane-of-polarization rotator. The signal lights having passed through the optical paths are combined by first coupler so that a polarization condition of the incident signal light is scrambled and output. Polarization dispersion is allowed to occur only after the signal light has passed through the plane-of-polarization rotator.

11 Claims, 10 Drawing Sheets



**FIG. 1****FIG. 2****FIG. 3****FIG. 4**

**FIG. 5**



**FIG. 6**

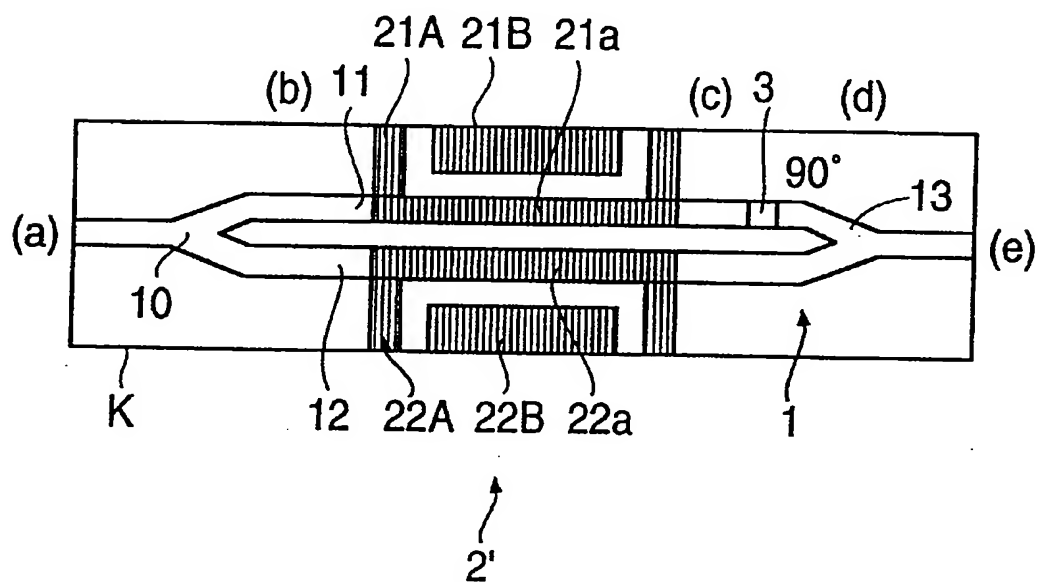
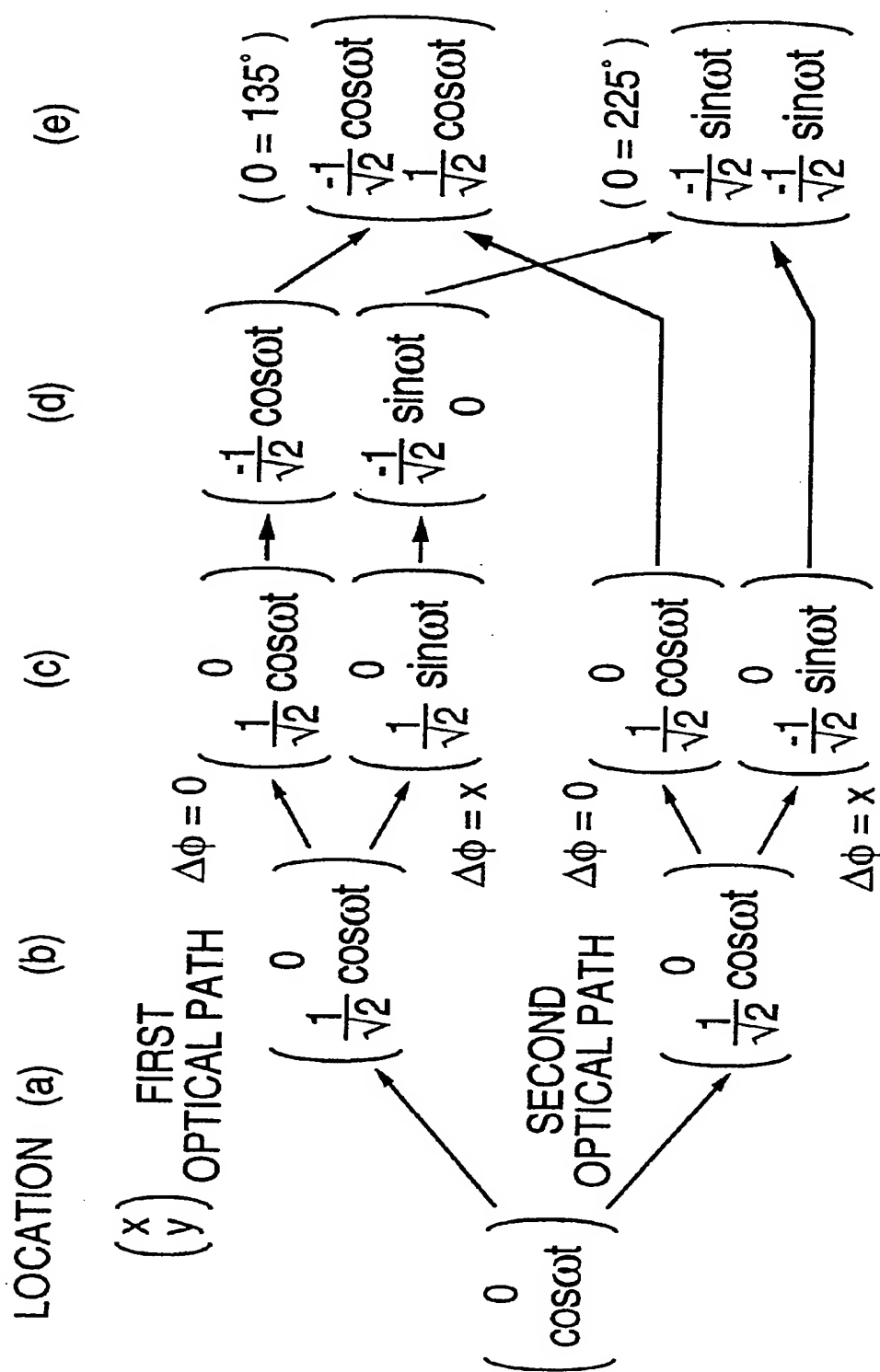
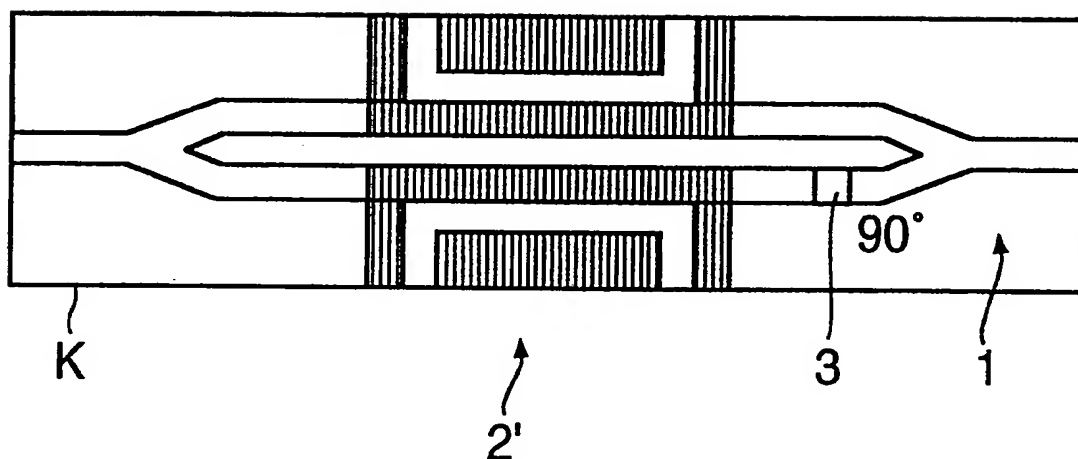
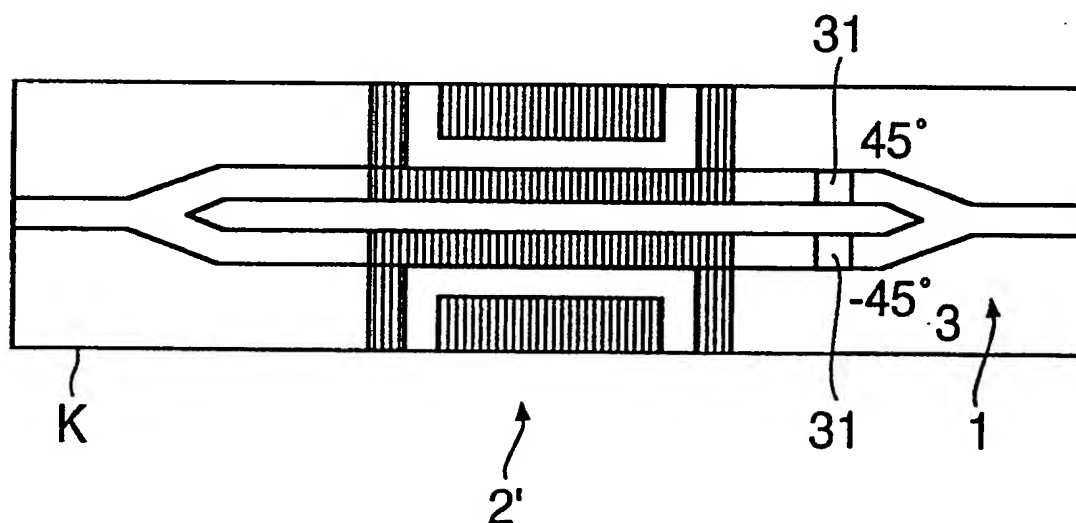
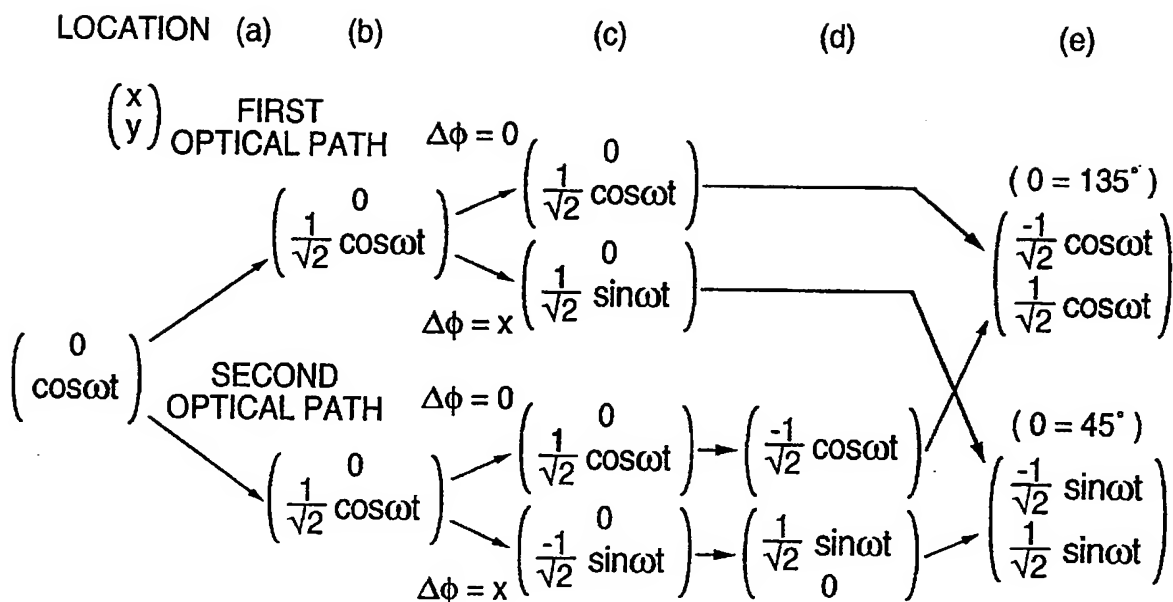
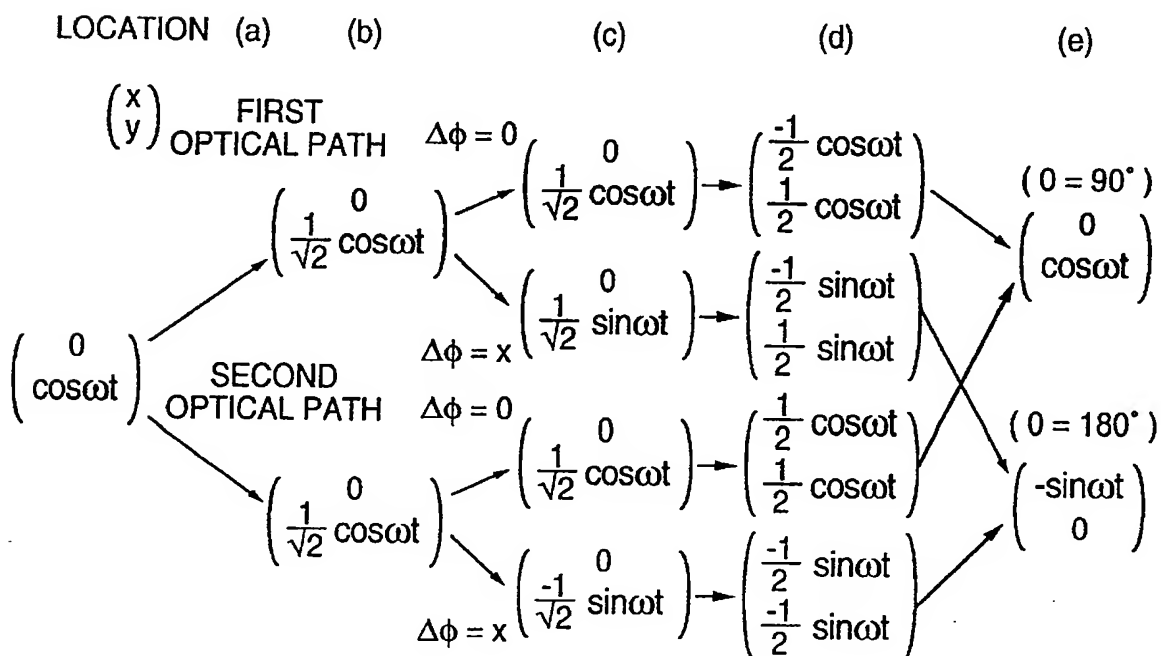


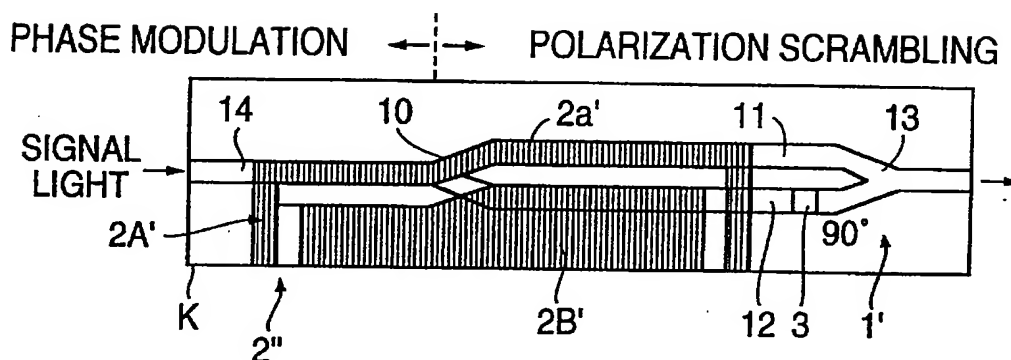
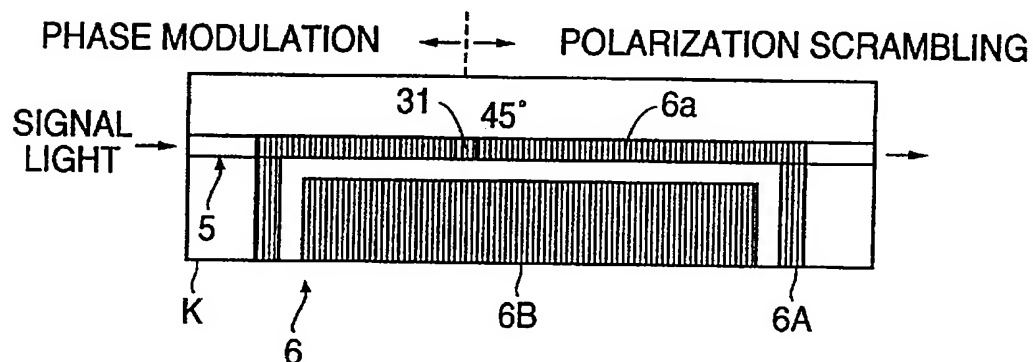
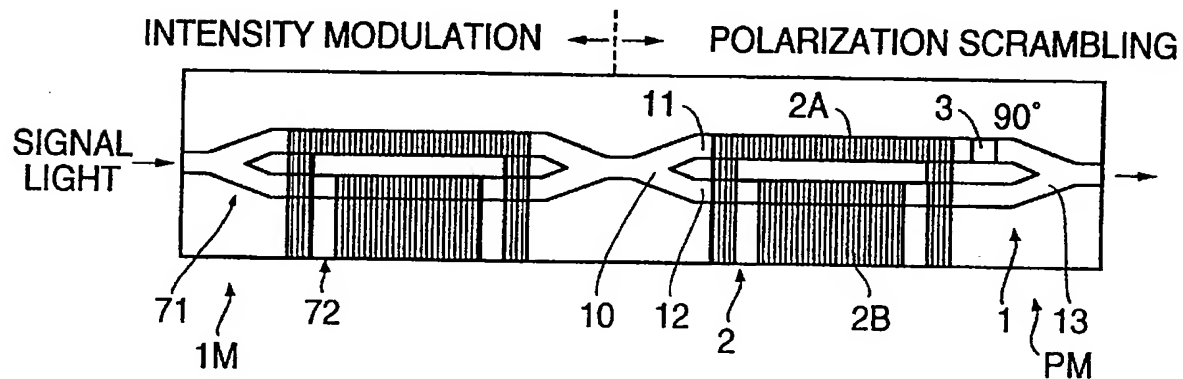


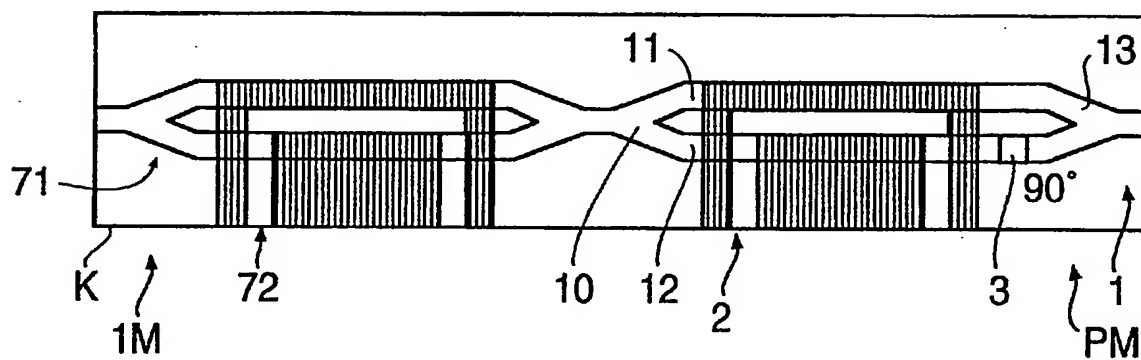
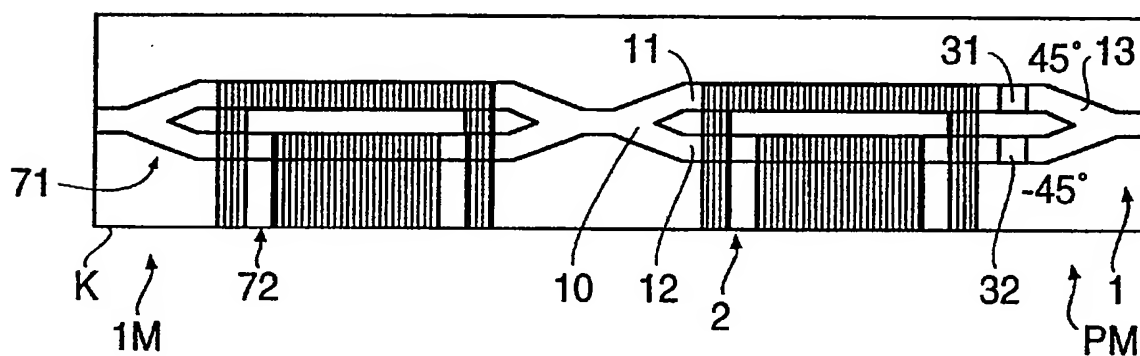
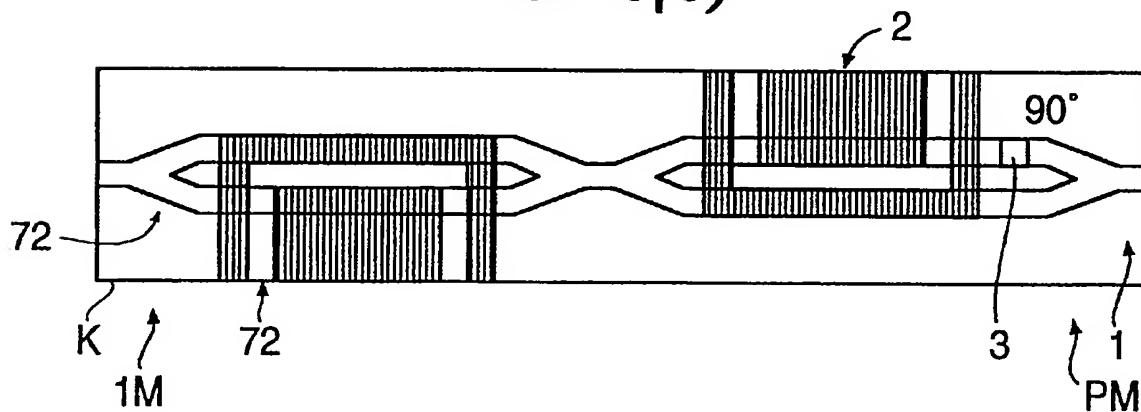
FIG. 7

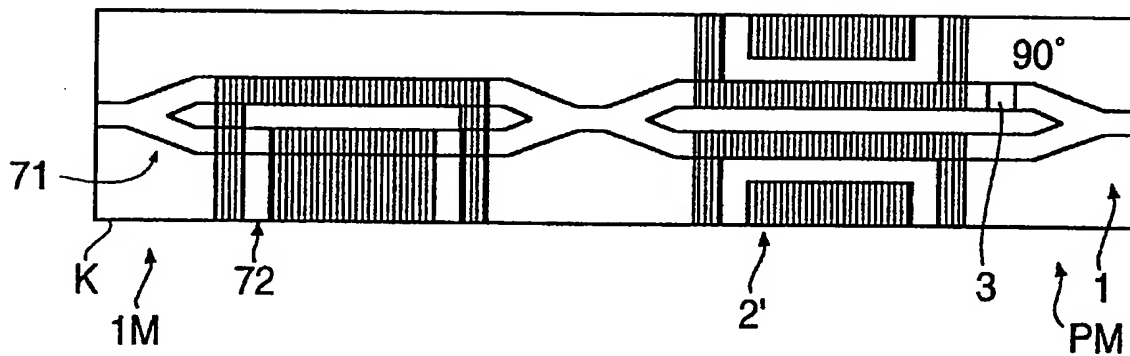
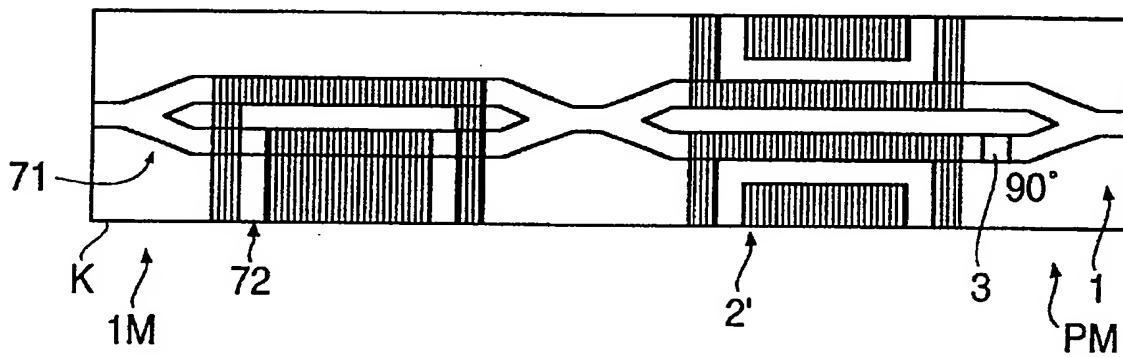
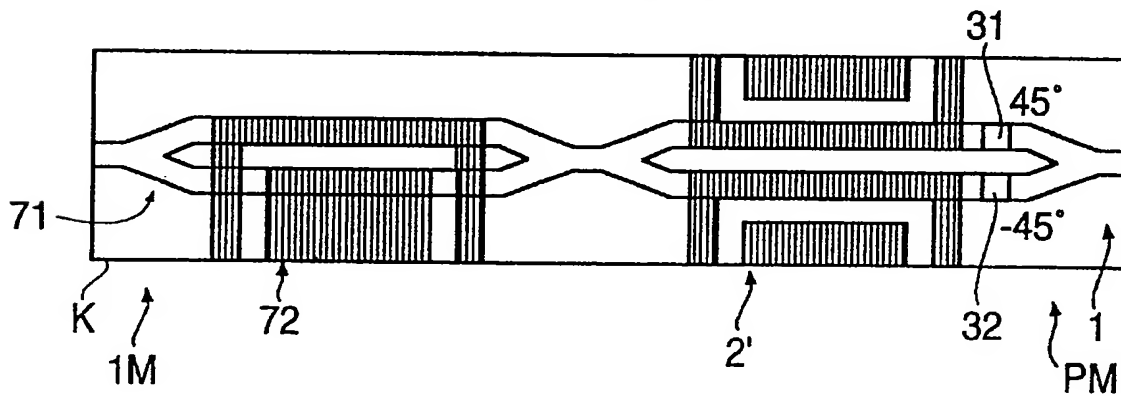


**FIG. 8(A)****FIG. 8(B)**

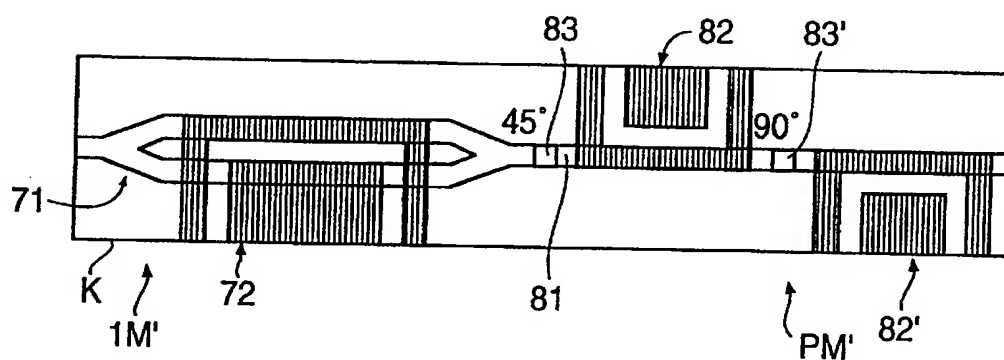
**FIG. 9(A)****FIG. 9(B)**

**FIG. 10****FIG. 11****FIG. 12**

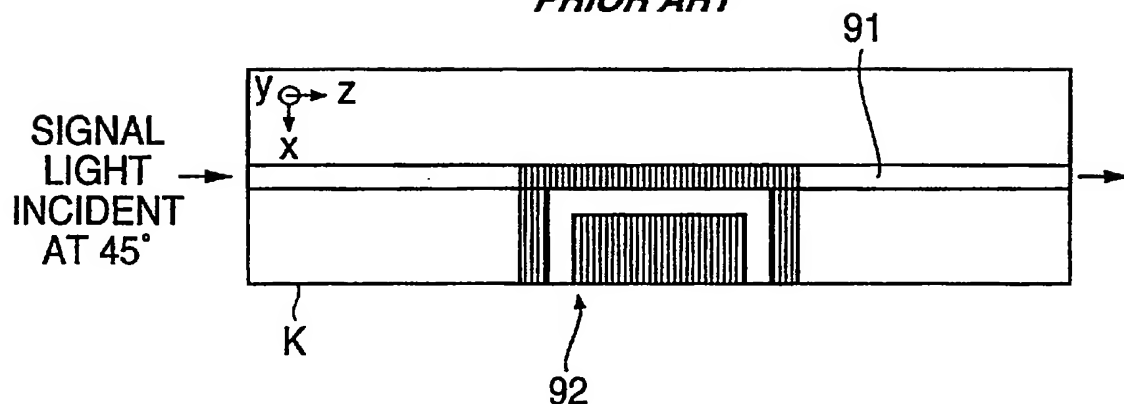
**FIG. 13(A)****FIG. 13(B)****FIG. 13(C)**

**FIG. 14(A)****FIG. 14(B)****FIG. 14(C)**

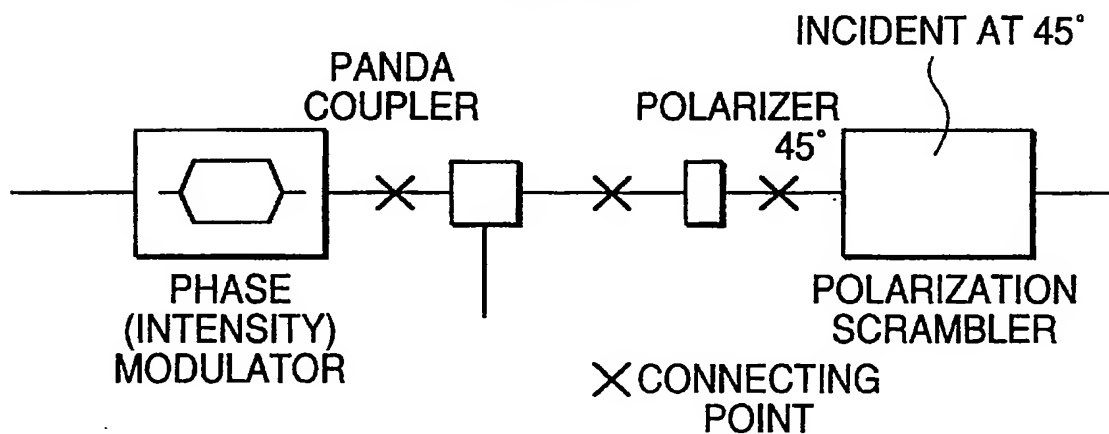




**FIG. 17**  
**PRIOR ART**



**FIG. 18**  
**PRIOR ART**



# **POLARIZATION SCRAMBLER AND INTEGRATED OPTICAL CIRCUIT MAKING USE THEREOF**

## **(1) Field of the Invention**

The present invention relates to a polarization scrambler which scrambles a polarization condition of a transmitted signal light as well as an integrated optical circuit making use thereof, and more specifically a polarization scrambler configured to reduce polarization dispersion as well as an integrated optical circuit which performs phase modulation, intensity modulation and polarization scrambling collectively.

## **(2) Related Art of the Invention**

An optical long-haul transmission system crossing an ocean as wide as thousands of kilometers has conventionally been carried out transmission using optical/electronic regeneration repeaters which convert optical signals into electric signals, and perform retiming, reshaping and regenerating of the signals. Under the present circumstances where progresses have been made in practical use of optical amplifiers, however, examinations are being made on optical amplifier repeated transmission systems which use optical amplifiers as linear repeaters. It is possible, by substituting the optical/electronic regeneration repeaters for optical amplifier repeaters, to remarkably reduce a number of parts disposed in repeaters and lower a cost with no degradation of reliability.

In 1993, M. G. Tayler pointed out a phenomenon that noise light produced by an optical amplifier repeater is dependent on a polarization condition of a signal light, thereby increasing excessive noise light (polarization hole burning). Since the polarization hole burning not only lowers a mean value of ratios of signal light relative to noise light (hereinafter referred to as optical SNR) but also increases fluctuation of optical SNRs, it posed a serious problem in optical amplifier repeater transmission.

The polarization scrambling which varies a polarization condition of a signal light positively on a transmission side has been proposed as a countermeasure for the polarization hole burning phenomenon. The polarization scrambling can be performed, for example, by a method to use a phase modulator, another method to apply a stress from a side surface of an optical fiber or a third method to use two optical sources.

F. Heismann et al, for example, succeeded in 1994 in improving a Q value by 4 dB at a repetition frequency of polarization condition of 40 kHz and 5 dB at 10.66 GHz by polarization scrambling using a phase modulator made of lithium niobate specified for 45° input in a polarization condition (LiNbO<sub>3</sub>; hereinafter referred to as LN) at a transmission speed of 5.33 Gb/s and a transmission distance of 8100 km. Polarization scrambling at the former repetition frequency which is lower than the transmission speed is referred to as low-speed polarization scrambling, whereas polarization at the latter repetition frequency which is higher than the transmission speed is referred to as high-speed polarization scrambling. The high-speed polarization scrambling has an effect to suppress a fluctuation of an optical SNR due to loss which is dependent on polarization in a transmission line and optical amplifier repeaters, thereby being capable of providing a more remarkably improvement.

Further, attentions are paid, as a method for enlarging capacities of optical transmission systems, to a wavelength division multiplexed (WDM) optical transmission system which transmits optical signals multiplexing two or more different wavelengths through a single transmission line.

A WDM optical amplifier repeater transmission system which is composed by combining the WDM optical transmission system with optical amplifier repeated transmission system described above is capable of amplifying optical signals having two or more different wavelengths collectively by using optical amplifiers, whereby the transmission system can have a simple (economical) configuration, a large capacity and a long transmission distance.

It is important for the WDM optical amplifier repeated transmission system to reduce degradation of transmission characteristic due to a nonlinear effects in a transmission line. For example, the four-wave mixing which is one of the nonlinear effects is produced most frequently when polarization conditions of a plurality of optical signals are coincident with one another. It is therefore possible, by carrying out the high-speed scrambling, to set so that coincidence of polarization conditions of a plurality of optical signals cannot be positively continued.

T. Naito et al., for example, succeeded in 1996 in lowering production ratio of the four-wave mixing by carrying out the high-speed polarization scrambling at a polarization repetition frequency twice as high as a transmission speed and confirmed improvement in a transmission characteristic in experiments of a four-wavelength multiplex transmission system having a transmission speed of 5.33 Gb/s and a transmission distance of 4800 km.

Further, another problem important for the WDM optical amplifier repeater transmission system is to shorten channel intervals, or increase a number of multiplex wavelengths. However, the high-speed polarization scrambling broadens a spectrum of a signal light and constitutes hindrance to set multiple wavelength at a higher density.

N. S. Bergano et al proposed in 1995 a high-speed polarization scrambling which broadens a spectrum of a signal light relatively a little and has a repetition frequency equal to a transmission speed. (See N. S. Bergano et al., '100 Gb/s WDM transmission of twenty 5 Gb/s NRZ data channels over transoceanic distances using a gain flattened amplifier chain', ECOC' 95, Th. A. 3. 1, pp. 967-970, 1995.)

The high-speed polarization scrambling suggested by this proposal is configured to perform polarization scrambling of a polarization condition of a signal light subjected to intensity modulation. However, it is necessary for improving a transmission characteristic to synchronize the intensity modulation of the signals with the polarization scrambling.

Further, N. S. Bergano et al. proposed in 1996 a system which uses a combination of intensity modulation, phase modulation and high-speed scrambling for improving a transmission characteristic. (See N.S. Bergano et al., 'Bit-synchronous polarization and phase modulation scheme for improving the performance of optical amplifier transmission systems', Electronics Letters, Vol. 32, No. 1, PP. 52-54, 1996.)

A polarization scrambler using an LN phase modulator is a hopeful candidate as means for realizing polarization scrambling. However, this polarization scrambler has a defect to produce a difference in transmission delays between optical components having different directions due to a fact that an LN optical waveguide has a refractive index which is largely different dependently on directions. For example, F. Heismann et al. reported that the polarization scrambler produced a difference of 16 ps in transmission delays. This difference means a high polarization dispersion and poses a problem since it constitutes a cause for degradation of a transmission characteristic.

As a countermeasure for such a high polarization dispersion, there has been proposed a technique to cancel the

polarization dispersion by connecting two LN phase modulators in parallel or in series so that an x axis of one LN optical waveguide is coincident with a y axis of the other LN optical waveguide and selecting voltages having phases reverse to each other for driving the LN modulators, for example, as reported by the inventor in the Autumn Communication Society Meeting by the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. Japan, B-755, 1995 ('Optical amplifier repeater transmission systems with polarization scrambling') and by Y. Fukada et al. in the Communication Society Meeting by the Institute of Electronics, Information and Communication Engineers. Japan, B-1102 ('Analysis of the spectrum of a carrier depolarized by a polarization scrambler'). This technique makes it possible to lower the polarization dispersion and narrow a spectrum of a light subjected to polarization scrambling.

However, the conventional technique described above requires, for preventing polarization dispersion from being caused by the polarization scrambling, combining same phase modulators and inputting an optical signal having a controlled polarization condition to each of the phase modulators, thereby posing problems that it complicates a system configuration for connecting the phase modulators to each other, and that it increases a number of required parts and a number of assembling stages, thereby enhancing a cost and making it difficult to configure a transmission system compact.

When the intensity modulation, phase modulation and polarization scrambling are to be performed collectively, a larger number of light connecting points are required and connection loss is increased, thereby posing problems that an SNR is lowered in transmission light, that a large number of expensive parts are required, that a number of assembling stages such as splices is increased and that the transmission system is expensive as a result.

### SUMMARY OF THE INVENTION

The present invention which has been made in view of the problems described above has an object to provide a polarization scrambler which is configured to reduce polarization dispersion, has a simple configuration and can be manufactured at a low cost. Another object of the present invention is to provide an integrated optical circuit which has a polarization scrambling function, a phase modulation function or a intensity modulation function and a simple configuration.

For accomplishing the objects described above, the polarization scrambler according to the present invention comprises a first splitter for splitting an incident signal light into two, a first optical path which is made of a material having an electrooptical effect and receives one of the signal lights split by the first splitter, a second optical path which is made of a material having an electrooptical effect and receives the other signal light split by the first splitter, a first voltage supplier which applies a voltage to at least one of sections set in the first optical path and the second optical path for varying a phase of a signal light propagated through the section, a first coupler which combines signal lights propagated through the first optical path and the second optical path, and a first plane-of-polarization rotator which rotates a polarization of the signal light in at least one of the first optical path and the second optical path between the section and the first coupler for adjusting a relative polarization angle between signal lights propagated through the first optical path and the second optical path.

In the polarization scrambler having the configuration described above, a signal light input into the first splitter is

split into two and propagated through the first and second optical paths, and a phase of the signal light is varied dependently on the voltage applied by the first voltage supplier. Further, polarization of the signal light propagated through at least one of the first and second optical paths is rotated by the first plane-of-polarization rotator, whereby the relative polarization angle between the signal lights is adjusted. The signal lights having passed through the first optical path and the second optical path are combined by the first coupler, whereby polarization condition of the incident signal light is scrambled and allowed to emerge.

Accordingly, the polarization dispersion is allowed only within a limited section after the signal light has passed through the plane-of-polarization rotator and it is therefore possible to obtain a polarization scrambler which has a simple configuration and scarcely allows polarization dispersion.

The first plane-of-polarization rotator can be configured so as to adjust the relative polarized wave angle between the signal lights to an angle around 90°. Further, the first plane-of-polarization rotator may comprise a first rotor in one of the first optical path and the second optical path between the section and the first coupler, and the first rotor rotates a polarization of the signal light approximately 90° or comprise a second rotor and a third rotor in the first optical path and the second optical path between the section and the coupler, one of the second rotor and the third rotor rotates a polarization of the signal light approximately 45°, and the other rotor rotates a polarization of the signal light approximately -45°.

Accordingly, the polarization conditions of the signal lights which have passed through the first optical path and the second optical path are adjusted by the first plane-of-polarization rotator so as to have a relative polarization angle around 90°. When a rotor is disposed in each of the first and second optical paths in particular, influences produced by inserting the plane-of-polarization rotator are approximately equalized between the optical paths, thereby making it possible to improve transmission performance for the combined signal light.

The first voltage supplier may be configured to apply voltages having phases reverse to each other to the sections set in the first optical path and the second optical path respectively.

Since the phases of the signal lights propagated through the first optical path and the second optical path are varied in directions different from each other by the first voltage supplier, amplitudes of the applied voltages are narrowed, thereby making it possible to reduce power consumption.

Further, the integrated optical circuit according to the present invention is an integrated optical circuit using the polarization scrambler described above. This integrated optical circuit comprises a third optical path which has an end joined to an input end of the first splitter of the polarization scrambler and the other end for propagating an input signal light to the first splitter, and is made of a material having an electrooptical effect and a first phase modulation voltage supplier which applies a predetermined voltage to a predetermined section set in the third optical path for performing phase modulation of a propagated signal light, wherein the integrated optical circuit is configured to allow a signal light in a linear polarization condition which has components only in one direction relative to the third optical path, perform phase modulation and polarization scrambling collectively and allow the signal light to emerge from the first coupler of the polarization scrambler.

In this integrated optical circuit, a signal light incident onto the third optical path is first subjected to the phase modulation by the first phase modulation voltage supplier while being propagated through the third optical path. Polarization scrambling of the signal light subjected to the phase modulation is carried out by propagating the signal light through the first splitter, the first and second optical path and the first coupler.

Another integrated optical circuit is an integrated optical circuit using the polarization scrambler described above, wherein the integrated optical circuit comprises a second splitter for splitting an incident signal light into two, a fourth optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which one of the signal lights split by the second splitter, a fifth optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which the other signal light split by the second splitter, a first intensity modulation voltage supplier which applies a predetermined voltage to at least one of predetermined sections set in the fourth optical path and the fifth optical path respectively for performing phase modulation of a signal light propagated through the section, and a second coupler which has an output end joined to an input end of the first splitter of the polarization scrambler, combines signal lights propagated through the fourth optical path and the fifth optical path, and output a combined signal light, wherein the integrated optical circuit is configured to allow signal lights in a linear polarization condition which has components only on one direction relative to the fourth optical path and the fifth optical path, perform intensity modulation and polarization scrambling collectively, and allow the signal light to emerge from the first coupler of the polarization scrambler.

In this integrated optical circuit, a signal light incident onto the second splitter is split into two, propagated through the fourth and fifth optical paths, subjected to the phase modulation by the first intensity modulation voltage supplier and combined by the second coupler for intensity modulation. Polarization scrambling is performed by propagating the signal light subjected to the intensity modulation through the first splitter, the first and second optical paths, and the first coupler.

Each of the integrated optical circuits makes it possible to carry out the phase modulation and the polarization scrambling or the intensity modulation and the polarization scrambling collectively and easily with a single integrated optical circuit, and reduce spectral diffusion of a signal light caused by the polarization scrambling. Further, the integrated optical circuit improves an optical SNR of a transmission light since it has optically connected points in a number smaller than that of the optically connected points formed by connecting a polarization scrambler to a phase modulator and an intensity modulator respectively. Furthermore, the integrated optical circuit described above requires no phase adjustment at a stage to connect the component units, reduces a number of required parts, reduces a number of assembling stages such as splices and lowers a necessity to use expensive parts, thereby lowering a cost. In addition, the integrated circuit requires no connecting optical fibers and can be configured compact.

Still another integrated optical circuit according to the present invention comprises phase modulator having an optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which a signal light is propagated, and phase modulation voltage supplier which applies a predetermined voltage to a section set in the optical path for phase modulation of the propagated signal light, a

polarization scrambler having an optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which a signal light is propagated, and a voltage supplier which applies a voltage to a section set in the optical path for varying a phase of the signal light propagated through the section, and a first plane-of-polarization rotator which connects an output end of the phase modulator to an input end of the polarization scrambler, rotates a polarization of a signal light propagated through the optical path of the phase modulator and outputs a signal light in a polarization condition where it has components in two directions. Further, the integrated optical circuit may have an electrode which applies a voltage commonly to the phase modulator and the polarization scrambler.

In the integrated optical circuit having the configuration described above, a signal light incident onto the optical path of the phase modulator is first propagated through the optical path for phase modulation by the phase modulation voltage supplier. A polarization of the signal light which has been subjected to the phase modulation is rotated by the first plane-of-polarization rotator, whereby the signal light is set in a polarization condition which has components in two directions. Polarized scrambling is carried out by the voltage supplier by propagating the signal light through the optical path of the polarization scrambler.

With the integrated optical circuit which has a simple configuration utilizing that of the conventional polarization scrambler, it is possible to perform phase modulation and polarization scrambling collectively and easily, improve a transmission characteristic, lower a cost and configure a optical transmission system compact.

Furthermore, a further another integrated optical circuit according to the present invention comprises an intensity modulator comprising a splitter for splitting an incident signal light into two, a first optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which one of signal lights split by the splitter is propagated, a second optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which the other signal light split by the splitter is propagated, an intensity modulation voltage supplier which applies a voltage to at least one of sections set in the first optical path and the second optical path for performing phase modulation of the signal light propagated through the section, and a coupler for combining signal lights propagated through the first optical path and the second optical path, a polarization scrambler having an optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which a signal light is propagated, and a voltage application section which applies a voltage to a section set in the optical path for varying a phase of the signal light propagated through the section, and a first plane-of-polarization rotator which connects an output end of the intensity modulator to an input end of the polarization scrambler, rotates a polarization of a signal light output from the coupler of the intensity modulator, and outputs a signal light in a polarization condition which has components in two directions to the optical path of the polarization scrambler, wherein the integrated circuit is configured to allow a signal light in a linear polarization condition which has components only in one direction to be incident onto the splitter of the intensity modulator, perform intensity modulation and polarization scrambling of the signal light collectively, and allow the signal light to emerge from the polarization scrambler.

In the integrated optical circuit having the configuration described above, a signal light incident onto the splitter of the intensity modulator is split into two and propagated

through the first and second optical paths, subjected to phase modulation by the intensity modulation voltage supplier and combined by the coupler for intensity modulation. A polarization of the signal light which has been subjected to the intensity modulation is rotated by the first plane-of-polarization rotator so that the signal light is set in a polarization condition having components in two directions and the signal light is propagated through the optical path of the polarization scrambler for polarization scrambling by the voltage supplier.

With the integrated optical circuit having the simple configuration utilizing the composition of the conventional polarization scrambler, it is possible to perform intensity modulation and polarization scrambling collectively and easily, improve a transmission characteristic, reduce a cost for an optical transmission system and configure it compact.

Moreover, the integrated optical circuit which utilizes the composition of the conventional polarization scrambler may comprise a second plane-of-polarization rotator for rotating approximately 90° a polarization of a signal light emerging from the polarization scrambler, and a compensating polarization scrambler having an optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which a signal light output from the second plane-of-polarization rotator is propagated, and a voltage supplier which applies a predetermined voltage to a predetermined section set in the optical path for varying a phase of the signal light propagated through the section, wherein the compensating polarization scrambler is configured to compensate polarization dispersion caused by the polarization scrambler.

In the integrated optical circuit having the configuration described above, a polarization of the signal light emerging from the polarization scrambler is rotated approximately 90° by the second plane-of-polarization rotator, whereby the components in the two directions in the optical path of the compensating polarization scrambler are converted to each other. When the signal light is propagated through the optical path of the compensating polarization scrambler, a polarization condition is varied so that polarization dispersion is cancelled by the voltage supplier.

Since the polarization dispersion caused by the polarization scrambler is cancelled by the compensating polarization scrambler, it is possible to obtain an integrated optical circuit having more excellent transmission characteristic.

Other objects, characteristics and merits of the present invention will be apparent from the following description of the embodiments made with reference to the accompanying drawings.

#### BRIEF EXPLANATION OF THE DRAWINGS

FIG. 1 is a plan view illustrating a configuration of a first embodiment of the polarization scrambler according to the present invention;

FIG. 2 is a diagram exemplifying a case where the first embodiment uses a coplanar strip line;

FIG. 3 is a diagram descriptive of polarization conditions in the first embodiment;

FIG. 4 is a plan view illustrating a configuration of a second embodiment of the polarization scrambler according to the present invention and polarization conditions therein;

FIG. 5 is a plan view illustrating a configuration of a third embodiment of the polarization scrambler according to the present invention and polarization conditions therein;

FIG. 6 is a plan view illustrating a configuration of a fourth embodiment of the polarization scrambler according to the present invention;

FIG. 7 is a diagram descriptive of polarization conditions in the fourth embodiment;

FIGS. 8(A) and 8(B) are diagrams exemplifying a case wherein disposition of a plane-of-polarization rotating element is modified;

FIGS. 9(A) and 9(B) are diagrams descriptive of polarization conditions in the configurations shown in FIGS. 8(A) and 8(B);

FIG. 10 is a plan view illustrating a configuration of a fifth embodiment of the integrated optical circuit according to the present invention;

FIG. 11 is a plan view illustrating a configuration of a sixth embodiment of the integrated optical circuit according to the present invention;

FIG. 12 is a plan view illustrating a seventh embodiment of the integrated optical circuit according to the present invention;

FIGS. 13(A), 13(B) and 13(C) are diagrams exemplifying modifications of a configuration of a polarization scrambler in the seventh embodiment;

FIGS. 14(A), 14(B) and 14(C) are diagrams exemplifying other modifications of the configuration of the polarization scrambler in the seventh embodiment;

FIG. 15 is a plan view illustrating a configuration of an eighth embodiment of the integrated optical circuit according to the present invention;

FIG. 16 is a diagram exemplifying disposition of an electrode pattern in the eighth embodiment;

FIG. 17 is a diagram exemplifying a configuration of a polarization scrambler using the conventional phase modulator; and

FIG. 18 is a diagram exemplifying a conventional configuration for performing phase modulation or intensity modulation and polarization scrambling collectively.

#### PREFERRED EMBODIMENTS

First, description will be made of a polarization scrambler adopting a phase modulator which is generally used.

A configuration of the polarization scrambler which uses the conventional phase modulator is exemplified in FIG. 17.

In FIG. 17, the polarization scrambler performs polarization scrambling with a phase modulator having a straight-line type LiNbO<sub>3</sub> (LN) optical waveguide 91 on which an electrode pattern 92 is disposed. The LN optical waveguide 91 is made of an LN crystal material having an electrooptical effect which is formed into a straight-line type optical waveguide and varies a refractive index for phase modulation by applying a modulation voltage from the electrode pattern 92 disposed on a surface thereof. The LN optical waveguide 91 receives an optical signal having linear polarization at an azimuth of approximately 45° relative to the x axis and the y axis shown in the drawing, and performs polarization scrambling by varying a phase difference between an x component and a y component of the input light in response to the modulation voltage. A phase difference  $\Delta\phi(t)$  is expressed by the following equation:

$$\Delta\phi(t) = \pi/\lambda [n_e^3 \gamma_{33} - n_o^3 \gamma_{13}] V(t)/L$$

wherein the reference  $\lambda$  represents a light wavelength, the reference symbol  $n_o$  designates a refractive index for the ordinary light, the reference symbol  $n_e$  denotes a refractive index for the extraordinary light, the reference symbols  $\gamma_{13}$  and  $\gamma_{33}$  represent electrooptical constants, the reference symbol  $V(t)$  designates a modulation (applied) voltage, the



reference symbol L denotes an electrode length and the reference symbol  $\Gamma$  represents a modulation voltage reduction coefficient. The phase difference  $\Delta\phi(t)$  is proportional to the modulation voltage as expressed by the equation.

The conventional polarization scrambler described above has a defect that a difference in transmission delays is produced between the components in the different directions due to a fact that the LN optical waveguide 91 has a refractive index which is largely different between the x and y directions.

Now, description will be made of the embodiments of the present invention which has been made taking the defect described above into consideration.

FIG. 1 shows a configuration of a first embodiment of the polarization scrambler according to the present invention.

In FIG. 1, the polarization scrambler is composed of an optical waveguide 1 which is configured in the Mach-Zehnder (hereinafter referred to as MZ) form on a base plate K, an electrode pattern 2 which is disposed as a first voltage supplier in a predetermined shape on the base plate K and a plane-of-polarization rotating element 3 which is inserted as a first rotor in a predetermined location in the optical waveguide 1. For description that follows, let us adopt, for the polarization scrambler, a rectangular coordinates system on which a signal light propagation direction is taken as the z axis, a direction perpendicular to the propagation direction in the plane of the base plate K is taken as the x axis and a direction perpendicular to the plane of the base plate K is taken as the y axis.

The optical waveguide 1 is made of a material having an electrooptical effect, for example, lithium niobate  $\text{LiNbO}_3$  (LN). The optical waveguide 1 is composed of a splitting section 10 functioning as first splitter for splitting an incident light into two, a first optical path 11 and a second optical path 12 through which split optical signals are to be propagated, and a combining section 13 serving as first coupler for combining signal lights from the first and second optical paths 11 and 12.

The electrode pattern 2 has, for example, a first electrode 2A which varies a refractive index for performing phase modulation of light by applying an electric field to the first optical path 11 and a second electrode 2B. The first electrode 2A is a pattern having an inverted U shape and disposed on the base plate K along the first optical path 11. The second electrode 2B is a rectangular pattern and disposed on the base plate K so as to be enclosed by the first electrode 2A with a predetermined spacing reserved therefrom. Applied to the first electrode 2A is a modulation voltage having a predetermined waveform described later and the second electrode 2B is grounded. Though the first embodiment is not limited to use the electrode pattern 2 which is similar to a microstrip line (asymmetrical coplanar strip line) but may adopt, for example, a coplanar strip line as shown in FIG. 2.

The combination of the optical waveguide 1 and the electrode pattern 2 has a composition similar to that of an LN type light modulator which is generally used.

The plane-of-polarization rotating element 3 is a rotor which output an input signal light after rotating its polarization approximately  $90^\circ$  in one direction. This rotating angle is not limited to  $90^\circ$  but may be around  $90^\circ$ , or concretely on the order of  $90 \pm 10^\circ$ . The plane-of-polarization rotating element 3 is inserted, for example, in the course of the first optical path. The inserting location is selected between the electrode pattern 2 and the combining section 13. As an inserting method, it is conceivable to insert the plane-of-polarization rotating element 3 prepared as an independent part into the optical waveguide 1 which is

preliminarily formed or to form the optical waveguide 1 integrally with the plane-of-polarization rotating element 3.

Now, description will be made of functions of the first embodiment.

First, a signal light emitted from a light transmitter (not shown) or the similar apparatus is incident onto the splitting section 10 of the optical waveguide 1. The incident signal light is controlled, for example, so that its polarization condition is in a vertical linear polarization (in the direction of the y axis) as indicated by a vector at a location (a) in FIG. 3. In FIG. 3, polarization conditions of the incident light at various location of the optical waveguide 1 are indicated by vectors on an xy plane. Using a horizontal component (in the direction of the x axis) and a vertical component (in the direction of the y axis), a polarization condition of the incident light is expressed by Equation (1):

$$(x, y) = (0, \cos \omega t) \text{ or } (0, \sin \omega t) \quad (1)$$

wherein the reference symbol  $\omega$  represents an angular frequency and the reference symbol t designates a time. Though only  $(0, \cos \omega t)$  is used for description that follows,  $(0, \sin \omega t)$  can also be used similarly for consideration of polarization conditions.

The signal light is split into two by the splitting section 10 and led into the first optical path 11 and the second optical path 12. Each of the split signal lights has a power equal to  $1/2$  of a power of the incident light. Since each of the signal lights is vertical linear polarization as shown at a location (b) in FIG. 3, or has a polarization condition which remains unchanged from that at the incident stage, and an optical power is proportional to a square of its electric field, each of the polarization conditions of the signal lights is expressed by Equation (2) which is similar to Equation (1):

$$(x, y) = (0, (1/2)^{1/2} \cos \omega t) \quad (2)$$

Then, phase modulation is performed by propagating the signal lights through the first optical path 11 and the second optical path 12 having the electrode pattern 2. A phase difference is produced between the signal lights since refractive index of the optical waveguide varies dependently on a modulation voltage applied to the electrode pattern 2, and speeds of the signal lights travelling through the first and second optical paths 11 and 12 are made different from each other. When an electric field of the signal light propagated through the first optical path 11 is represented by E1 and an electric field of the signal light propagated through the second optical path 12 is designated by E2, the electric fields E1 and E2 are expressed as follows:

$$E1 = \cos(\omega t + \phi1), E2 = \cos(\omega t - \phi2)$$

wherein the reference symbols  $\phi1$  and  $\phi2$  represent phases of the signal lights propagated through the first and second optical paths 11 and 12 respectively.

A phase difference  $\Delta\phi (= \phi1 - \phi2)$  is proportional to an applied modulation voltage as described above. The modulation voltage is set so as to periodically vary the phase difference  $\Delta\phi$  substantially within a range of  $0 \sim \pi$ . In the first embodiment, the phase difference  $\Delta\phi$  is periodically modulated at  $0.768 \pi \sin \phi t$  ( $\omega$ : repetition frequency) by applying, for example, a modulation voltage having a sinusoidal wave to the electrode pattern 2. Speaking more concretely, the phase of the signal light propagated through a first optical path 11 is varied dependently on a modulation voltage applied to the a first electrode 2A, whereas the phase of the signal light propagated through the second optical path 12 remains substantially constant since the second electrode 2B

is grounded. Polarization conditions of the signal lights which have been subjected to the phase modulation are shown at a location (c) in FIG. 3. The polarization condition of the signal light propagated through the first optical path 11 is shown as a condition wherein a substantial phase difference  $\Delta\phi$  becomes 0 or  $\pi$  and this phase difference is used also for description that follows. These polarization conditions are expressed as follows:

$$\begin{aligned} \text{In the first optical path } (x, y) &= (0, (1/2)^{1/2} \cos \omega t) [\Delta\phi = 0] \\ &= (0, -(1/2)^{1/2} \cos \omega t) [\Delta\phi = \pi] \end{aligned} \quad (3)$$

$$\text{In the second optical path } (x, y) = (0, 1/2^{1/2} \cos \omega t) [\Delta\phi = 0 \sim \pi]$$

Out of the signal lights which have been subjected to the phase modulation, the signal light propagated through the first optical path 11 is input into the plane-of-polarization rotating element 3 and its polarization is rotated approximately  $90^\circ$ . Generally speaking, a conversion for rotating a polarization at an angle of  $\alpha^\circ$  can be expressed by a matrix  $R(\alpha)$  represented by the following numeral 1.

$$R(\alpha) = \begin{pmatrix} \cos \alpha & -\sin \alpha \\ \sin \alpha & \cos \alpha \end{pmatrix} \quad [\text{Numeral 1}]$$

A polarization condition of a signal light output from the plane-of-polarization rotating element 3 is shown at a location (d) in FIG. 3. This condition is expressed as follows:

$$\begin{aligned} (x, y) &= (-(1/2)^{1/2} \cos \omega t, 0) [\Delta\phi = 0] \\ &= ((1/2)^{1/2} \cos \omega t, 0) [\Delta\phi = \pi] \end{aligned} \quad (4)$$

Then, the signal light having passed through the plane-of-polarization rotating element 3 and the signal light propagated through the second optical path 12 are combined and output. The combined signal light is in a linear polarization wherein an angle  $\theta$  formed between the x axis and a polarization is  $135^\circ$  at phase difference  $\Delta\phi=0$  and the angle  $\theta$  formed between the x axis and the polarization is  $45^\circ$  at a phase difference of  $\Delta\phi=\pi$ . This polarization condition is expressed as follows:

$$\begin{aligned} (x, y) &= (-1/2 \cos \omega t, 1/2 \cos \omega t) [\Delta\phi = 0] \\ &= (1/2 \cos \omega t, 1/2 \cos \omega t) [\Delta\phi = \pi] \end{aligned} \quad (5)$$

Polarization scrambling of the signal light transmitted from a light transmitter or the similar apparatus is performed as described above. In the first embodiment, polarization dispersion caused by the polarization scrambler is limited within a section from the plane-of-polarization rotating element 3 to an exit end of the combining section 3. In other words, signal lights are composed only of components having the same direction (the direction of the y axis) and polarization dispersion is scarcely caused in the splitting section 10, the first optical path 11 and the second optical path 12, whereas the signal lights have x axis components and y axis components, and polarization dispersion is caused only in a section from the plane-of-polarization rotating element 3 to the exit end of the combining section 13. Accordingly, the first embodiment is capable of reducing the polarization dispersion below approximately  $1/3$  of that caused in the conventional polarization scrambler which has an optical path length equal to that of the first embodiment

and uses a phase modulator receiving an incident light at an angle of  $45^\circ$  (having the x and y components).

As understood from the foregoing description, the first embodiment makes it possible to provide a polarization scrambler which has a simple on configuration and allows a little polarization dispersion by disposing a plane-of-polarization rotating element 3 in the optical waveguide 1 having a composition similar to that of the general LN type light modulator. On an assumption that the optical waveguide 1 and the plane-of-polarization rotating element 3 can be integrated with each other, it is possible to manufacture the polarization scrambler preferred as the first embodiment through steps which are substantially the same as those for the conventional LN type light modulator.

Now, description will be made of a second embodiment.

In the second embodiment, a location for inserting a plane-of-polarization rotating element is selected in a second optical path 12 in place of the first optical path 11 which is selected as the location for inserting the plane-of-polarization rotating element 3 in the first embodiment.

FIG. 4 shows a configuration of the second embodiment and polarization conditions of a signal light.

Concretely speaking of a difference between the polarization scrambler preferred as the second embodiment and the first embodiment with reference to FIG. 4, a plane-of-polarization rotating element 3 is inserted in a second optical path 12 between a combining section 13 and an electrode pattern 2 in the second embodiment. The plane-of-polarization rotating element 3 is the same as that used in the first embodiment but is disposed at a different location. Other members of the second embodiment remain unchanged from those of the first embodiment and will not be described in particular. Like the first embodiment, the second embodiment is not limited to the electrode pattern 2 which is of a microstrip line type shown in FIG. 4 but may adopt an electrode pattern of a coplanar strip line type (see FIG. 2).

Now, functions of the second embodiment will be described below.

At steps from the incidence of a signal light onto the splitting section 10 to the phase modulation in the first optical path 11 and the second optical path 12, the polarization scrambler preferred as the second embodiment functions quite the same as the first embodiment, and polarization conditions at various locations are indicated by vectors at locations (a) through (c) and expressed by Equations (1) through (3) described above.

The signal light which has passed under the electrode pattern 2 through the second optical path 12 is input into the plane-of-polarization rotating element 3 and its polarization is rotated approximately  $90^\circ$ . A polarization condition at this time is indicated at a location (d) in FIG. 4 and expressed as follows:

$$(x, y) = (-(1/2)^{1/2} \cos \omega t, 0) [\Delta\phi = 0 \sim \pi] \quad (4')$$

The signal light which has passed through the first optical path 11 and the signal light which has passed through the plane-of-polarization rotating element 3 are combined by the combining section 13 and output. The combined signal light is in a linear polarization where an angle  $\theta$  formed between the x axis and a polarization is  $135^\circ$  at a phase difference  $\Delta\phi=0$  and an angle  $\theta$  formed between the x axis and the polarization is  $225^\circ$  at a phase difference  $\Delta\phi=\pi$ . This is expressed as follows:

$$(x, y) = (-1/2 \cos \omega t, 1/2 \cos \omega t) [\Delta \phi = 0] \quad (5)'$$

$$= (-1/2 \cos \omega t, -1/2 \cos \omega t) [\Delta \phi = \pi]$$

The second embodiment having the configuration wherein the plane-of-polarization rotating element 3 is inserted in the second optical path 12 can provide an effect similar to that of the first embodiment.

Now, a third embodiment will be described below.

The third embodiment is characterized in that two plane-of-polarization rotating elements 31 and 32 are disposed in a first optical path 11 and a second optical path 12 respectively in place of the plane-of-polarization rotating element 3 used in the first or second embodiment.

FIG. 5 shows a configuration of the third embodiment and polarization conditions of a signal light.

As shown in FIG. 3, a polarization scrambler preferred as the third embodiment has a configuration wherein the plane-of-polarization rotating element 31 is disposed as a second rotor at the location of the plane-of-polarization rotating element 3 in the first embodiment and the plane-of-polarization rotating element 32 is disposed as a third rotor at the location of the plane-of-polarization rotating element 3 in the second embodiment. Other members of the third embodiment are the same as those of the first or second embodiment and will not be described in particular.

The plane-of-polarization rotating element 31 receives a signal light which has passed under an electrode pattern 2 through the first optical path 11 and outputs the signal after rotating its polarization approximately 45°. The plane-of-polarization rotating element 32 receives a signal light which has passed under the electrode pattern 2 through the second optical path 12 and outputs the signal after rotating its polarization approximately -45°. The plane-of-polarization rotating elements 31 and 32 are not limited to the rotating angles of 45° and -45°, but may have a relative rotating angle around 90°, or concretely on the order of 90±10°. The plane-of-polarization rotating elements 31 and 32 can be inserted by a method similar to that for the plane-of-polarization rotating element 3 described above.

Now description will be made of functions of the third embodiment.

At stages from the incidence of the signal light onto the splitting section 10 to the phase modulation in the first optical path 11 and the second optical path 12, the polarization scrambler preferred as the third embodiment functions similarly to the first embodiment, and polarization conditions at various locations are indicated by vectors at locations (a) through (c) in FIG. 5 and expressed by Equations (1) through (3) described above.

The signal light which has passed through the first optical path 11 under the electrode pattern 2 is input into the plane-of-polarization rotating element 31 and its polarization is rotated approximately 45° (according to the matrix  $R(\alpha=45)$  described above). A polarization condition at this time is shown at a location (d) in FIG. 5 and expressed as follows:

$$(x, y) = (-1/2 \cos \omega t, 1/2 \cos \omega t) [\Delta \phi = 0] \quad (4.1)$$

$$= (1/2 \cos \omega t, -1/2 \cos \omega t) [\Delta \phi = \pi]$$

Further, the signal light which has passed through the second optical path 12 under the electrode pattern 2 is input into the plane-of-polarization rotating element 32 and its polarization is rotated approximately -45° (according to the

matrix  $R(\alpha=-45)$  described above). A polarization condition at this time is shown at a location (d) in FIG. 5 and expressed as follows:

$$(x, y) = (\frac{1}{2} \cos \omega t, \frac{1}{2} \cos \omega t) [\Delta \phi = 0 - \pi] \quad (4.2)$$

The signal lights having passed through the plane-of-polarization rotating elements 31 and 32 are combined by the combining section 13 and output. The combined signal light is linear polarization in a condition where an angle  $\theta$  formed between the x axis and the polarization 90° at phase difference  $\Delta \phi = 0$  and the angle formed between the x axis and the polarization is 0° at a phase difference  $\Delta \phi = \pi$ . This polarization condition is expressed as follows:

$$(x, y) = (0, \cos \omega t) [\Delta \phi = 0] \quad (5)''$$

$$= (\cos \omega t, 0) [\Delta \phi = \pi]$$

The third embodiment performs polarization scrambling of a signal light emitted from a light transmitter or a similar apparatus as described above and is capable of reducing polarization dispersion. Further, the third embodiment is capable of improving a transmission characteristic for the combined signal light since it has a configuration wherein the first optical path 11 and the second optical path are symmetrical, thereby nearly equalizing influences due to the insertion of the plane-of-polarization rotating element in both the optical paths.

Now, a fourth embodiment will be described below.

The fourth embodiment is characterized in that it uses an electrode pattern 2' which has a shape different from that of the electrode pattern adopted in each of the first through third embodiments.

FIG. 6 shows a configuration of the fourth embodiment.

As shown in FIG. 6, the electrode pattern 2' of the polarization scrambler preferred as the fourth embodiment is composed, unlike the electrode pattern 2, of four electrodes 21A, 21B, 22A and 22B. Members other than the electrode pattern 2' are the same as those of the first embodiment and will not be described in particular.

The electrode pattern 21A is a U-shaped pattern and has a side 21a disposed on a base plate K so as to be along a first optical path 11, whereas the electrode pattern 21B is a rectangular pattern which is disposed on the base plate K so that its periphery is enclosed by the electrode 21A with a predetermined spacing reserved therefrom. In contrast, the electrode 22A is a U-shaped pattern which is disposed on the base plate K along a second optical path 12 so that a side 22a is along a second optical path 12 and the electrode 22a is a rectangular pattern which is disposed on the base plate K so that its periphery is enclosed by the electrode 22A with a predetermined spacing reserved therefrom. Modulation voltages having phases reverse to each other, a waveform which is the same as that of the modulation voltage described above and an amplitude equal to 1/2 of that of the modulation voltage are applied to the electrodes 21A and 22A, whereas the electrodes 21B and 22B are grounded.

Description will be made of functions of the fourth embodiment.

From a stage where a signal light is incident on the splitting section 10 to a stage where split signal lights are led into the first optical path and the second optical path 12, functions of a polarization scrambler preferred as the fourth embodiment remain unchanged from those of the first, second or third embodiment, but phase modulation performed in each of the optical paths of the fourth embodiment

is different from that in the first, second or third embodiment. Since it is difficult to represent polarization conditions of the signal light subjected to phase modulation in the fourth embodiment simply by vectors on the xy plane, functions of the fourth embodiment will be described by expressing the polarization conditions with x and y components of its electric field.

FIG. 7 shows variations of polarization conditions at various locations in a optical waveguide 1. Locations (a) through (e) correspond to those represented by the same reference symbols in FIG. 6.

A polarization condition of the signal light incident on the polarization scrambler and polarization conditions of signal lights split by the splitting section 10 are the same as those expressed by Equations (1) and (2). In the fourth embodiment which applies modulation voltages to both the first optical path 11 and the second optical path 12, phases of the signal lights passing through the optical paths are varied. Polarization conditions of the signal lights which have passed under the electrode pattern 2' are expressed at a location (c) in FIG. 7. As in the first embodiment, a signal light which has passed through the first optical path 11 is input into the plane-of-polarization element 3 and its polarization is rotated approximately  $90^\circ$ . A polarization condition of the signal light is expressed at a location (d) in FIG. 7. Signal lights which have passed through the optical paths are combined by the combining section 13 and output. The polarization condition of the combined signal light is linear polarization in a condition where an angle  $\theta$  formed between the x axis and the polarization is  $135^\circ$  at phase difference  $\Delta\phi=0$  and the angle formed between the x axis and the polarization  $\theta$  is  $225^\circ$  at phase difference  $\Delta\phi=\pi$  as shown at a location (e) in FIG. 7.

The fourth embodiment which uses the electrode pattern 2' not only provides an effect similar to that obtained by the first embodiment but also permits reducing an amplitude of applied modulation voltages to  $\frac{1}{2}$  of that adopted for the first embodiment, thereby reducing electric power consumed by the polarization scrambler.

Though the plane-of-polarization rotating element 3 is inserted in the first optical path 11 in FIG. 6 as in the first embodiment (FIG. 1), a composition of the fourth embodiment which uses the electrode pattern 2' is not limited to that shown in FIG. 6. For example, the fourth embodiment may select a composition similar to that of the second embodiment wherein the plane-of-polarization rotating element 3 is inserted in the second optical path 12 as shown in FIG. 8(A) or a composition similar to that of the third embodiment wherein the plane-of-polarization rotating elements 31 and 32 are inserted in the first and second optical paths 11 and 12 respectively as shown in FIG. 8(B). When the fourth embodiment adopts either of these compositions, its functions can be considered similarly. Polarization conditions in the composition shown in FIG. 8(A) are expressed in FIG. 9(A), whereas polarization conditions in the composition shown in FIG. 8(B) are illustrated in FIG. 9(B).

Now, description will be made of a fifth embodiment.

The fifth embodiment is an embodiment of an invention defined by claim 6, or is an integrated optical circuit wherein the polarization scrambler preferred as the second embodiment has an additional phase modulation function for performing phase modulation and polarization scrambling at the same time.

FIG. 10 shows a configuration of the fifth embodiment.

The configuration of the integrated optical circuit preferred as the fifth embodiment shown in FIG. 10 is different from that of the polarization scrambler preferred as the

second embodiment in that a optical waveguide 1' having a phase modulator 14 as a third optical path is used in place of the optical waveguide 1 and that an electrode pattern 2" has a shape which is selected by modifying the shape of the electrode pattern 2 so as to be adapted to the phase modulator 14. Other members of the fifth embodiment are the same as those of the second embodiment and will not be described in particular.

The optical waveguide 1' is composed by joining a phase modulator 14 which is a optical waveguide having a predetermined length to an input end of the splitting section 10 of the optical waveguide 1 described above. The phase modulator 14 is made of a material having an electrooptical effect which is the same as that for the splitting section 10, first optical path 11, second optical path 12 and combining section 13, and the optical waveguide 1' is formed integrally as a whole.

The electrode pattern 2" has a first electrode 2A' which applies an electric field to the phase modulator 14, splitting section 10 and first optical path 11 for performing phase modulation of light, and a second electrode 2B'. The first electrode 2A' is a pattern which has a nearly U-shape and is disposed on the base plate K so that one side 2a' is along the phase modulator 14, splitting section 10 and first optical path 11. The second electrode 2B' is a nearly rectangular pattern which is disposed on the base plate K so that its periphery is enclosed by the first electrode 2A' with a predetermined spacing reserved therefrom. A modulation voltage which is similar to that used in the second embodiment is applied to the first electrode 2A' and the second electrode 2B' is grounded. Phase modulation of a signal light passing through the phase modulator 14 is varied dependently on a length of a portion of the first electrode 2A' disposed along the phase modulator 14. Accordingly, the length of this portion is set adequately in accordance with phase modulation required for phase modulation which is performed together with polarization scrambling. The electrode pattern 2" functions as first modulation voltage supplier and first voltage supplier as described above. Though the electrode pattern 2" is described as the microstrip line type, a coplanar strip line may be used as the electrode pattern 2".

In the integrated optical circuit, a signal light transmitted from a light transmitter or the similar apparatus is controlled to a vertical linear polarization and incident on the optical waveguide 1'. The incident signal light is subjected to phase modulation by the phase modulator 14. The phase modulation performed by this phase modulator 14 is the same as that performed by the conventional phase modulator and will not be described in particular. The signal light which is subjected to the phase modulation is split by the splitting section 10 into two, led into the first optical path 11 and the second optical path 12, whereafter a signal light which is subjected to phase modulation in the first optical path 11, and a signal light which has passed through the second optical path 12 and the plane-of-polarization rotating element 3 are combined by the combining section 13 to perform polarization scrambling.

As understood from the foregoing description, the fifth embodiment permits composing an integrated optical circuit which has both a phase modulation function and a polarization scrambling function, thereby easily enabling to obtain means for performing a combination of phase modulation and polarization scrambling which has conventionally been proposed for reducing spectral diffusion due to polarization scrambling. Compared with a case where a phase (or intensity) modulator, a panda coupler, a polarizer and a polarization scrambler are connected to one another, for

example, with polarization-preserving fibers as in the conventional configuration shown in FIG. 18, the integrated optical circuit reduces optically connected points and connection loss, thereby improving optical SNR in a transmission light. Further, the integrated optical circuit requires no phase adjustment at a stage to connect the component units, reduces a number of required parts and a number of assembling steps such as splices, and lowers necessity to use expensive parts, thereby lowering a cost for a transmission system. In addition, the integrated optical circuit requires no optical fiber for connecting parts and can be configured compact.

Though the fifth embodiment has the composition wherein the plane-of-polarization rotating element 3 is disposed in the second optical path 12, it may have a composition in which the plane-of-polarization rotating element 3 is disposed in the first optical path 11 as in the first embodiment or a composition wherein the plane-of-polarization rotating elements 31 and 32 are disposed in the first and second optical paths 11 and 12 respectively as in the third embodiment.

Now, a sixth embodiment will be described below.

The sixth embodiment is an embodiment of an invention defined by claim 8 or 9 and is an integrated optical circuit which integrates a polarization scrambler of the conventional straight line type (FIG. 19) with a phase modulator.

FIG. 11 shows a configuration of the sixth embodiment.

The integrated optical circuit is composed, as shown in FIG. 11, of a straight line type optical waveguide 5 formed on a base plate K, an electrode pattern 6 which is disposed in a predetermined shape on the base plate K, and a plane-of-polarization rotating element 31 which is inserted in the middle portion of the optical waveguide 5 and functions as first plane-of-polarization rotator (the same as that used in the third embodiment).

The optical waveguide 5 is made of a material having an electrooptical effect which is similar to that selected for the optical waveguide 1 described above. The plane-of-polarization rotating element 31 is inserted in the middle portion of the optical waveguide 5. The optical waveguide 5 functions as an optical path of phase modulator and as an optical path of polarization scrambler.

The electrode pattern 6 has a first electrode 6A and a second electrode 6B. The first electrode 6A is a U-shaped pattern which is disposed on the base plate K so that a side 6a is along the optical waveguide 5. A length of the side 6a, as measured from an end on the side of incidence to a point located over the plane-of-polarization rotating element 31, is set in accordance with an application voltage required for phase modulation and a length of the side 6a, as measured from the point located over the plane-of-polarization rotating element 31 to an end on the side of exit, is set in accordance with an application voltage required for polarization scrambling. The second electrode 6B is a rectangular pattern which is disposed on the base plate K so that its periphery is enclosed by the first electrode 6A with a predetermined spacing reserved therefrom. A modulation voltage which is similar to that used in the conventional polarization scrambler is applied to the first electrode 6A, whereas the second electrode 6B is grounded. Accordingly, the electrode pattern functions as phase modulation voltage supplier and as voltage supplier. Though the electrode pattern 6 is described as the microstrip line type, a coplanar strip line may be used as the electrode pattern 6.

In the integrated optical circuit, a signal light transmitted from a light transmitter or the similar apparatus is incident in a condition controlled to a vertical linear polarization

(direction of the y axis). The incident signal light is subjected to phase modulation while it is propagated through the optical waveguide 5 to the plane-of-polarization rotating element 31. Operations for the phase modulation are substantially the same as those performed by the conventional phase modulator. The signal light which is subjected to the phase modulation is input into the plane-of-polarization rotating element 31 and its polarization is rotated approximately 45°. Accordingly, the polarization of the signal light which has passed through the plane-of-polarization rotating element is set in a condition where it has x components and y components. This condition is similar to that of a linear polarization of the signal light which is input into the conventional polarization scrambler at an azimuth of approximately 45°. Accordingly, polarization scrambling is performed by propagating the signal light through the optical waveguide 5 disposed subsequently to the plane-of-polarization rotating element 31.

Like the fifth embodiment, the sixth embodiment makes it possible to perform phase modulation and polarization scrambling at the same time with an integrated optical circuit having a simple configuration by selecting a composition for the integrated optical circuit in which the plane-of-polarization rotating element 31 is inserted in the course of the optical waveguide 5 of the straight line type light modulator. However, the sixth embodiment does not provide an effect to reduce polarization dispersion since its polarization scrambling function is equivalent to that of the conventional polarization scrambler. Though the fifth embodiment is more excellent than the sixth embodiment from the viewpoint of reduction of polarization dispersion, the sixth embodiment has a merit to permit applying a voltage for phase modulation and polarization scrambling with a single electrode.

Now, a seventh embodiment will be described below.

The seventh embodiment is an embodiment of an invention defined by claim 7 or is an integrated optical circuit which has an intensity modulation function added to the polarization scrambler preferred, for example, as the first embodiment so that intensity modulation and polarization scrambling can be performed at the same time.

FIG. 12 shows a configuration of the seventh embodiment.

An integrated optical circuit preferred as the seventh embodiment is composed of a polarization scrambler section PM having a composition which is the same as that of the first embodiment and an intensity modulator section IM joined to an incidence side of the polarization scrambler section PM. The intensity modulator section IM has a composition which is the same as that of the ordinary LN type light modulator and has an optical waveguide whose exit end is joined to an incidence end of the polarization scrambler section PM. The composition of the intensity modulator section IM is the same as that of the polarization scrambler section PM from which a plane-of-polarization rotating element 3 is removed. The intensity modulator section IM has an optical waveguide 71 corresponding to the optical waveguide 1 and an electrode pattern 72 corresponding to the electrode pattern 2, and is integrated with the polarization scrambler section PM. Accordingly, the optical waveguide 71 functions as the second splitter, fourth and fifth optical paths and second coupler, whereas the electrode pattern 72 functions as first intensity modulation voltage supplier.

In the integrated optical circuit, a signal light transmitted from a light transmitter or the similar apparatus is controlled to have a vertical linear polarization (direction of the y axis)



and incident onto the optical waveguide 71 of the intensity modulator section IM. The incident signal light is subjected to intensity modulation in accordance with a modulation voltage applied from the electrode pattern 72 while being propagated through the optical waveguide 71. Operations for this intensity modulation are the same as those for intensity modulation performed by the conventional LN type light modulator and will not be described in particular. The signal light having a vertical linear polarization (direction of the y axis) which is subjected to the intensity modulation is shifted into an optical waveguide 1 of the polarization scrambler section PM. In the polarization scrambler section PM, the signal light which has been subjected to the intensity modulation is polarization scrambled by functions which are similar to those of the first embodiment.

The seventh embodiment permits easily obtaining means for performing a combination of the intensity modulation and polarization scrambling proposed for reducing spectral diffusion of a signal light due to polarization scrambling by composing an integrated optical circuit which integrates an intensity modulation function with a polarization scrambling function. Since the composition of the intensity modulator section IM is similar to that of the polarization scrambler section PM in particular, the integrated optical circuit can easily be designed and manufactured. Compared with a case wherein an LN type light modulator is connected to a polarization scrambler, the integrated optical circuit provides effects, like those obtained by the fifth embodiment which integrates the phase modulation function with the polarization scrambling function, to improve optical SNR in a transmission light by reducing a number of optically connected points, eliminate phase adjustment, reduce a number of parts, reduce a number of assembling steps and adopt inexpensive parts, thereby lowering costs for optical transmission systems. In addition, the seventh embodiment makes it possible to configure optical transmission systems compacter by integrating component units.

Though the polarization scrambler section PM has a composition wherein the plane-of-polarization rotating element 3 is disposed in the first optical path 11 in the seventh embodiment, the integrated optical circuit according to the present invention is not limited to this composition. The polarization scrambling section PM may have, for example, a composition similar to that of the second embodiment wherein the plane-of-polarization rotating element 3 is disposed in the second optical path 12 as shown in FIG. 13(A) or a composition similar to that of the third embodiment wherein the plane-of-polarization rotating elements 31 and 32 are disposed in the first and second optical paths 11 and 12 respectively as shown in FIG. 13(B). Further, the positional relationship of the electrode pattern 2 of the polarization scrambling section PM relative to the electrode pattern 72 of the intensity modulator section IM in the seventh embodiment may be reversed as shown in FIG. 13(C). Furthermore, it is possible to modify the shape of the electrode pattern 2 of the polarization scrambler section PM into that of the electrode pattern 2' used in the fourth embodiment as shown in FIGS. 14(A) through 14(C). This modification makes it possible to lower power consumption by the polarization scrambler section PM.

Now, description will be made of an eighth embodiment.

The eighth embodiment is an embodiment of an invention defined by claims 10 or 11 and is configured to compose an integrated optical circuit by using the conventional straight line type polarization scrambler in a polarization scrambler section so that it can perform, like the seventh embodiment, intensity modulation and polarization scrambling at the same time.

FIG. 15 shows a configuration of the eighth embodiment.

An integrated optical circuit preferred as the eighth embodiment is composed, as shown in FIG. 15, of an intensity modulator section IM functioning as intensity modulator like that used in the seventh embodiment and a polarization scrambling section PM' joined to an exit end of the intensity modulator section IM.

The polarization scrambler section PM' is composed of a straight line type optical waveguide 81 formed on a base plate K, two electrode patterns 82 and 82' formed in predetermined shapes on the base plate K, a plane-of-polarization rotating element 83 which is inserted into a joined portion between the optical waveguide 81 and the intensity modulator section IM as first plane-of-polarization rotator for rotating a polarization of an incident light approximately 45° (similar to the plane-of-polarization rotating element 31 used in the third embodiment), and a plane-of-polarization rotating element 83' which is inserted into a middle portion of the optical waveguide 81 as second plane-of-polarization rotator for rotating a polarization approximately 90° (similar to the plane-of-polarization rotating element 3 used in the first embodiment). The optical waveguide 81 is made of a material having an electrooptical effect (such as LN) like the optical waveguide 1 described above. One end of the optical waveguide 81 is joined to an exit end of the optical waveguide 71 of the intensity modulator section IM by way of the plane-of-polarization rotating element 83 and a plane-of-polarization rotator 83' is inserted into a predetermined location of a middle portion of the optical waveguide 81.

The electrode pattern 82 has two electrodes 82A and 82B. The electrode 82A has a U shape and a side 82a which is disposed on the base plate K so as to be along the optical waveguide 81 between the plane-of-polarization rotating elements 83 and 83'. The electrode 82B is a U-shaped pattern which is disposed on the base plate K so that its periphery is enclosed by the electrode 82A with a predetermined spacing reserved therefrom. An electrode pattern 82' has a shape similar to that of the electrode pattern 82 and a side 82a' which is disposed on the base plate K so as to be along the optical waveguide 81 between the plane-of-polarization rotating element 83' and an exit end of the optical waveguide 81. A modulation voltage which is similar to that used in the conventional polarization scrambler is applied to the electrodes 82A and 82A', whereas the electrodes 82B and 82B' are grounded. Though the electrode patterns are also as the microstrip line type, coplanar strip lines may be used as the electrode patterns. The electrode patterns 82 and 82' may be arranged otherwise, for example, symmetrically as shown in FIG. 16.

The optical waveguide 81 functions as an optical path for the polarization scrambler and as an optical path for a compensating polarization scrambler, the electrode pattern 82 serves as voltage supplier for the polarization scrambler, and the electrode pattern 82' functions as voltage supplier for the compensating polarization scrambler. Further, plane-of-polarization rotating element 83 functions as plane-of-polarization rotator for connecting the intensity modulator to the polarization scrambler, whereas the plane-of-polarization rotating element 83' serves as plane-of-polarization rotator for connecting the polarization scrambler to the compensating polarization scrambler. In the intensity modulator section IM which has the composition similar to that of the seventh embodiment, the optical waveguide 71 functions as splitter of the intensity modulator, the first and second optical paths, and coupler, whereas the electrode pattern 72 serves as intensity modulation voltage supplier.

In the integrated optical circuit, a signal light transmitted from a light transmitter or the similar apparatus is controlled to have a vertical linear polarization (direction of the y axis) and input into the optical waveguide 71 of the intensity modulator section IM for intensity modulation. The signal light having the vertical linear polarization which is subjected to the intensity modulation is input into the plane-of-polarization rotating element 83 and its polarization is rotated approximately 45°. Accordingly, the signal light which has passed through the plane-of-polarization rotating element 83 is set in a condition where it has x components and y components. While passing under the electrode pattern 82, the x components and the y components of this signal light are subjected to phase modulation by functions similar to those of the conventional phase modulator. At this stage, polarization dispersion occurs due to a difference in refractive indices between the x and y directions. For cancelling this polarization dispersion, the plane-of-polarization rotating element 83' converts the x components and the y components by rotating the polarization approximately 90° and phase modulation similar to that described above is performed by passing the signal light under the electrode pattern 82'. Accordingly, the polarization dispersion is cancelled and polarization scrambling is performed.

The eighth embodiment which is configured to compose an integrated optical circuit by integrating the conventional LN type light modulator with the known straight line type polarization scrambler which reduces polarization dispersion provides effects similar to those obtained by the seventh embodiment, or makes it possible to perform intensity modulation and polarization scrambling at the same time with an integrated optical circuit having a simple composition, thereby enabling to improve a transmission characteristic, lower a manufacturing cost and configure optical transmission systems compactly.

Though the optical waveguides are made of lithium niobate (LN) in the first through eighth embodiment described above, a material for the optical waveguides used in the polarization scrambler according to the present invention is not limited to lithium niobate but the optical waveguides may be made of any material that has an electrooptical effect.

Further, the present invention is not limited to the embodiments described above and those skilled in the art will understand from the foregoing description that the present invention is modifiable.

What is claimed is:

1. A polarization scrambler comprising:

a first splitter for splitting an incident signal light into two;

a first optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which one of the signal light split by said first splitter is propagated;

a second optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which the other signal light split by said first splitter is propagated;

a first voltage supplier which applies a voltage to at least one of sections set in said first optical path and said second optical path for varying a phase of a signal light propagated through the section;

a first coupler which combines signal lights propagated through said first optical path and said second optical path; and

a first plane-of-polarization rotator which rotates a polarization of the signal light in at least one of said first optical path and said second optical path between said section and said first coupler for adjusting a relative polarization angle between signal lights propagated through said first optical path and said second optical path.

2. A polarization scrambler according to claim 1 wherein said first plane-of-polarization rotator adjusts the relative polarization angle between said signal lights around 90°.

3. A polarization scrambler according to claim 2 wherein said first plane-of-polarization rotator comprises a first rotor in one of said first optical path and said second optical path between said section and said first coupler, and said first rotor rotates a polarization of the signal light approximately 90°.

4. A polarization scrambler according to claim 2 wherein said first plane-of-polarization rotator comprises a second rotor and a third rotor in said first optical path and said second optical path between said predetermined section and said coupler, one of said second rotor and said third rotor rotates a polarization of the signal light approximately 45°, and the other rotor rotates a polarization of the signal light approximately -45°.

5. A polarization scrambler according to claim 1 wherein said first voltage supplier applies voltages having phases reverse to each other to the sections set in said first optical path and said second optical path.

6. An integrated optical circuit using the polarization scrambler as claimed in claim 1 comprising:

a third optical path which has an end joined to an input end of the first splitter of said polarization scrambler and the other end for propagating an input signal light to said first splitter, and is made of a material having an electrooptical effect; and

a first phase modulation voltage supplier which applies a predetermined voltage to a predetermined section set in said third optical path for performing phase modulation of a propagated signal light,

wherein said integrated optical circuit is configured to allow a signal light in a linear polarization condition which has components only in one direction relative to said third optical path, perform phase modulation and polarization scrambling collectively and allow the signal light to emerge from the first coupler of said polarization scrambler.

7. An integrated optical circuit according to claim 1 comprising:

a second splitter for splitting an incident signal light into two;

a fourth optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which one of the signal lights split by said second splitter;

a fifth optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which the other signal light split by said second splitter;

a first intensity modulation voltage supplier which applies a predetermined voltage to at least one of predetermined sections set in said fourth optical path and said fifth optical path respectively for performing phase modulation of a signal light propagated through the section; and

a second coupler which has an output end joined to an input end of the first splitter of said polarization scrambler, combines signal lights propagated through said fourth optical path and said fifth optical path, and output a combined signal light,

wherein said integrated optical circuit is configured to allow signal lights in a linear polarization condition which has components only on one direction relative to said fourth optical path and said fifth optical path, perform intensity modulation and polarization scrambling collectively, and allow the signal light to emerge from the first coupler of said polarization scrambler.

8. An integrated optical circuit comprising:
- a phase modulator having an optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which a signal light is propagated, and phase modulation voltage supplier which applies a predetermined voltage to a section set in said optical path for phase modulation of the propagated signal light;
  - a polarization scrambler having an optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which a signal light is propagated, and a voltage supplier which applies a voltage to a section set in said optical path for varying a phase of the signal light propagated through the section; and
  - a first plane-of-polarization rotator which connects an output end of said phase modulator to an input end of said polarization scrambler, rotates a polarization of a signal light propagated through the optical path of said phase modulator and outputs a signal light in a polarization condition where it has components in two directions.
9. An integrated optical circuit as claimed in claim 8 comprising an electrode which applies a voltage commonly to said phase modulator and said polarization scrambler.
10. An integrated optical circuit comprising:
- an intensity modulator comprising splitter for splitting an incident signal light into two, a first optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which one of signal lights split by said splitter is propagated, a second optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which the other signal light split by said splitter is propagated, an intensity modulation voltage supplier which applies a voltage to at least one of sections set in said first optical path and said second optical path for performing phase modulation of the signal light propagated through the section, and a coupler for combining signal lights propagated through said first optical path and said second optical path;

- a polarization scrambler having an optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which a signal light is propagated, and a voltage application section which applies a voltage to a section set in said optical path for varying a phase of the signal light propagated through the section; and
  - a first plane-of-polarization rotator which connects an output end of said intensity modulator to an input end of said polarization scrambler, rotates a polarization of a signal light output from the coupler of said intensity modulator, and outputs a signal light in a polarization condition where it has components in two directions to the optical path of said polarization scrambler,
- wherein said integrated circuit is configured to allow a signal light in a linear polarization condition which has components only in one direction to be incident onto the splitter of said intensity modulator, perform intensity modulation and polarization scrambling of the signal light collectively, and allow the signal light to emerge from said polarization scrambler.
11. An integrated optical circuit according to claim 8 or 10 comprising:
- second plane-of-polarization rotator for rotating approximately 90° a polarization of a signal light emerging from said polarization scrambler; and
  - a compensating polarization scrambler having an optical path which is made of a material having an electrooptical effect and through which a signal light output from said second plane-of-polarization rotator is propagated, and a voltage supplier which applies a predetermined voltage to a predetermined section set in said optical path for varying a phase of the signal light propagated through the section,
- wherein said compensating polarization scrambler is configured to compensate polarization dispersion caused by said polarization scrambler.

\* \* \* \* \*